

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DES PÂTES ET PAPIERS

PAR
MICHEL GUILLEMETTE JR

ÉTUDE SYSTÉMATIQUE DES EFFETS DE L'INTRODUCTION
DE FIBRES DÉSENCRÉES DANS UN MÉLANGE
POUR PAPIER JOURNAL

JUIN 1995

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

À Julie

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
RÉSUMÉ	ii
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	viii
NOMENCLATURE	x
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
1. ASPECTS THÉORIQUES ET REVUE DE LA LITTÉRATURE	4
1.1 Législations et fibres recyclées	4
1.2 Influences de la pâte de fibres désencrées sur l'industrie canadienne du papier journal	6
1.2.1 Situation précédant la venue de la pâte de fibres désencrées	6
1.2.2 Situation actuelle	8
1.3 Effets du recyclage sur les propriétés papetières de la pâte de fibres désencrées	9
1.4 Effets de la pâte de fibres désencrées sur les propriétés papetières du papier journal	10
1.5 Optimisation des mélanges de pâtes	13
1.5.1 Interactions entre les composants d'un mélange	15

1.5.2 Comportement des propriétés structurales des mélanges	18
1.5.3 Comportement des propriétés mécaniques des mélanges	19
1.5.4 Comportement des propriétés optiques des mélanges	22

CHAPITRE II

2. ÉLABORATION DE LA PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE	28
2.1 Choix des essais papetiers à réaliser	30
2.2 Choix des variables de design	35
2.2.1 Choix des composants du mélange	35
2.2.2 Choix des variables de procédé	37
2.3 Élaboration du plan expérimental	41
2.3.1 Design expérimental des quatre composants du mélange	43
2.3.2 Design expérimental des deux variables de procédé	48
2.3.3 Jumelage des designs SCD et CCD	50
2.4 Procédure expérimentale	54
2.4.1 Désintégration des pâtes vierges	55
2.4.2 Détermination de la consistance des suspensions de pâtes vierges	57
2.4.3 Préparation des mélanges	58
2.4.4 Détermination de la consistance des mélanges	62
2.4.5 Détermination de l'indice d'égouttage des mélanges	62
2.4.6 Dilution des mélanges	62
2.4.7 Préparation des formettes	63
2.4.8 Réalisation des essais papetiers	63
2.4.8.1 Essais non-destructifs	64

2.4.8.2 Essais physiques	65
--------------------------------	----

CHAPITRE III

3. MODÉLISATION	66
3.1 Modèle polynomial de régression	67
3.2 Rappel de notions statistiques	68
3.2.1 La table d'analyse de variance	68
3.2.2 Coefficients de détermination R^2 et R_A^2	70
3.2.3 Test d'hypothèse F	71
3.2.4 Test du manque d'ajustement	73
3.3 Modèle de régression proposé	77
3.4 Estimation des coefficients de régression	78
3.4.1 Procédure REG	79
3.4.2 Procédure RSREG	86
3.5 Détermination des modèles de régression	89
3.5.1 Commentaires sur le choix des modèles de régression	89
3.5.2 Commentaires sur les paramètres estimés des modèles de régression	92
3.5.2.1 Effets du facteur X_4 (pâte kraft)	93
3.5.2.2 Effets du facteur X_3 (pâte de fibres désencrées)	95
3.5.2.3 Effets du facteur X_2 (pâte thermomécanique)	96
3.5.2.4 Effets du facteur X_1 (pâte mécanique de meules)	96
3.5.2.5 Effets du facteur Z_1 (grammage des formettes)	97
3.5.2.6 Effets du facteur Z_2 (raffinage de la pâte kraft)	98

CHAPITRE IV

4. OPTIMISATION	102
4.1 Notions générales sur l'optimisation	103
4.1.1 Fonction de désirabilité globale	104
4.1.2 Fonction de désirabilité globale adaptée	106
4.1.2.1 Fonction de désirabilité de la déchirure	109
4.1.2.2 Fonction de désirabilité de l'opacité	110
4.1.2.3 Fonction de désirabilité du coût	112
4.1.2.4 Fonction de désirabilité de la pâte désencrée	115
4.2 Étude du cas n°1	119
4.3 Étude du cas n°2	122
4.4 Étude du cas n°3	123
4.5 Étude du cas n°4	126
4.6 Étude du cas n°5	129
4.7 Étude du cas n°6	132
4.8 Étude du cas n°7	137
4.9 Bilan des résultats obtenus pour l'optimisation	143
CONCLUSIONS	146
ANNEXE A Détermination de la résistance du papier à l'état humide	151
ANNEXE B Développement des modèles de régression de base	154
ANNEXE C Exemple d'un fichier de données (.GMS) pour GAMS	157
ANNEXE D Exemple d'un fichier de résultats (.LST) pour GAMS	160
ANNEXE E Tableaux des résultats expérimentaux	177

ANNEXE F	Tables d'ANOVA des modèles des 9 propriétés papetières analysées	188
ANNEXE G	Tables d'ANOVA des modèles des autres propriétés papetières	201
RÉFÉRENCES	208

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier spécialement Messieurs Jacques L. Valade et Robert Lanouette pour leur indispensable collaboration et leurs judicieux conseils et, ainsi que Madame Lise Bourdages pour son aide précieuse.

Par ailleurs, je ne peux m'empêcher de remercier aussi tout le personnel du Centre de recherche en pâtes et papiers de l'Université du Québec à Trois-Rivières pour son appui soutenu tout au long des quelques vingt mois passés au centre de recherche.

Finalement, mes derniers remerciements vont aux compagnies Kruger et Cartons St-Laurent qui ont fourni la matière première et rendu ainsi possible, la réalisation de ce travail.

RÉSUMÉ

L'industrie des pâtes et papiers a subi ces dernières années d'énormes pressions provenant de diverses sources pour qu'elle respecte de plus en plus l'environnement. C'est suite à ces pressions que la pâte de fibres recyclées a connu une expansion remarquable. En quelques années seulement, plusieurs unités de désencrage ont démarré tant aux États-Unis qu'ici au Canada. Étant donné que la pâte de fibres désencrées (PFD) a été imposée aux producteurs par le biais, entre autres, de lois, ceux-ci n'ont ainsi pas eu le loisir d'étudier cette pâte pendant plusieurs années avant de l'introduire dans leurs recettes de pâte. C'est pourquoi, on retrouve encore très peu de publications portant sur l'introduction de PFD dans le papier journal. Nous avons donc voulu profiter de cette lacune pour étudier les effets de l'introduction de la PFD dans un mélange pour papier journal tout en utilisant une méthode expérimentale bien structurée basée sur une méthode statistique. Suite à une étude approfondie de la littérature concernant la PFD et les mélanges de pâtes en général, nous avons déterminé quatre pâtes (pâte mécanique de meules -PMM-, pâte thermo-mécanique -PTM-, PFD et pâte kraft semi-blanchie de résineux -PKSBR-) et deux variables de procédés (grammage des formettes et taux de raffinage de la PKSBR) pour construire notre plan expérimental. Les quatre pâtes choisies sont très répandues chez les producteurs de papier journal.

L'introduction du grammage des formettes a permis d'évaluer, entre autres, les effets de la diminution du grammage sur l'opacité du papier. Le taux de raffinage de la PKSBR a été inclus dans cette étude de façon à vérifier si l'optimisation des propriétés papetières d'un des composants du mélange permettrait d'améliorer les propriétés finales du mélange. Ainsi, le plan expérimental a dû être construit en utilisant deux plans de base distincts. Le premier plan de base permet de traiter les quatre composants du mélange et la forme de ce plan est un tétraèdre ou centroïde simplex (SCD). Le nombre de points expérimentaux correspondant au SCD est de 16. Pour les deux variables de procédés, nous avons utilisé un plan expérimental conventionnel soit le plan composite centré (CCD) qui comporte quant à lui 9 points expérimentaux. Le jumelage des deux plans s'est effectué en plaçant un SCD sur chacun des neuf points expérimentaux du CCD. Le nombre total de points expérimentaux est donc de 144. Nous avons ainsi effectué 144 observations pour chacune des 15 propriétés papetières dont 9 sont analysées dans le texte principal. La matrice comportant tous les facteurs principaux et secondaires (42 au total) et les observations des 15 propriétés papetières mesurées possède ainsi 144 rangés par 57 colonnes. Cette matrice a été soumise au logiciel d'analyses statistiques SAS qui a déterminé les modèles de régression linéaire de chacune des propriétés papetières. La variance expliquée par les modèles de régression est supérieure à 95% pour toutes les propriétés. Nous n'avons pas utilisé de termes d'ordre supérieur à 2 pour effectuer la modélisation. En ce qui concerne l'opacité, l'analyse des termes quadratiques nous indique que le grammage a une influence significative au niveau du manque d'ajustement du modèle de régression mais la variance expliquée par les

termes quadratiques est très faible. Ceci s'applique aussi à la plupart des autres propriétés. Suite à la modélisation, nous avons utilisé un autre logiciel (GAMS) pour effectuer l'étape de l'optimisation. Pour optimiser simultanément la déchirure, l'opacité et le coût du mélange, nous avons utilisé ce qu'on appelle une fonction de désirabilité. La combinaison de cette fonction et du plan expérimental que nous avons développé a très bien répondu à nos attentes. Les résultats obtenus permettent ainsi de conclure que l'introduction de PFD dans le mélange pour papier journal n'est pas une alternative mais bien une contrainte. En effet, l'introduction de PFD entraîne une augmentation des coûts de production tout en diminuant sensiblement l'ensemble des propriétés physiques. C'est pourquoi, on doit forcer le logiciel d'optimisation à inclure de la PFD dans le mélange optimal. Par ailleurs, l'analyse des mélanges optimaux obtenus permet de constater que la PTM est une pâte très équilibrée en soit. On peut ainsi produire un papier de très bonne qualité en utilisant une proportion de presque 95% de PTM. En ce qui concerne le taux de raffinage de la PKSBR, l'étude réalisée démontre que le taux de raffinage n'aurait pas dû être inclus dans le plan expérimental puisque les mélanges optimaux ont besoin du taux de raffinage minimal pour maximiser la déchirure. La PKSBR non-raffinée possédant un indice de déchirure très élevé aurait permis de diminuer la proportion de PKSBR des mélanges tout en améliorant la déchirure et en diminuant le coût des mélanges. La vérification du grammage indique que le grammage minimal qu'on peut utiliser tout en respectant les normes de qualité est d'environ 42 g/m². Le plan expérimental développé pour effectuer ce travail, nous a obligé à passer beaucoup de temps au laboratoire. Cependant, il nous a permis

de combiner des variables de procédés à des variables de mélange et de nous donner une grande flexibilité au niveau de l'analyse (modélisation et optimisation).

LISTE DES TABLEAUX

2.1	: Méthodes normalisées	32
2.2	: Propriétés papetières mesurées	33
2.3	: Propriétés papetières calculées	34
2.4	: Caractéristiques des pâtes vierges	40
2.5	: Les 16 points expérimentaux du SCD	47
2.6	: Exemple pour le point (1.41, 0) du CCD	52
2.7	: Points participant au calcul de l'erreur expérimentale	54
2.8	: Quantité de pâte sèche requise par mélange	58
2.9	: Modèle pour le calcul des volumes des pâtes	61
3.1	: Table de l'analyse de variance (ANOVA)	70
3.2	: Points participant au calcul de l'erreur expérimentale	75
3.3	: Table d'ANOVA modifiée pour le manque d'ajustement	76
3.4	: Exemple de la présentation du fichier de données pour SAS	81
3.5	: Compilation des tables d'ANOVA des modèles de régression	90
3.6	: Compilation des tables d'ANOVA des paramètres estimés	94
3.7	: Caractéristiques de la pâte kraft raffinée	100
4.1	: Normes de qualité du papier journal	107
4.2	: Coûts utilisés pour effectuer l'optimisation	114

4.3	: Description des cas d'optimisation analysés	117
4.4	: Conditions initiales associées aux cas d'optimisation	117
4.5	: Résultats obtenus pour le cas n° 1	120
4.6	: Résultats obtenus pour le cas n° 2	123
4.7	: Résultats obtenus pour le cas n° 3	124
4.8	: Résultats obtenus pour le cas n° 4	127
4.9	: Résultats obtenus pour le cas n° 5	130
4.10	: Résultats obtenus pour le cas n° 6	134
4.11	: Résultats obtenus pour le cas n° 7	138
4.12	: Désirabilité globale de plusieurs options pour le cas n° 7	140
4.13	: Compilation des résultats obtenus pour les 7 cas d'optimisation	145

LISTE DES FIGURES

1.1	: Interactions entre les composants d'un mélange binaire	16
1.2	: Relation entre pâtes mécaniques et pâtes chimiques	22
1.3	: Comportement de la blancheur dans un mélange binaire	24
1.4	: Comportement de l'opacité dans un mélange binaire	25
2.1	: Design expérimental centroïde simplex (SCD)	45
2.2	: Face type du SCD	46
2.3	: Plan composite centré (CCD)	50
2.4	: Jumelage des designs SCD et CCD	51
2.5	: Étapes de la procédure expérimentale	56
3.1	: Exemple de la procédure REG	80
3.2	: Exemple de la procédure RSREG	87
3.3	: Comportement des mélanges pour la déchirure et l'opacité en fonction de X_2 et X_4	95
4.1	: Graphique des résultats obtenus pour les cas n° 1 et n° 2	121
4.2	: Premier graphique des résultats obtenus pour le cas n° 3	125
4.3	: Deuxième graphique des résultats obtenus pour le cas n° 3	126
4.4	: Graphique des résultats obtenus pour le cas n° 4	129
4.5	: Graphique des résultats obtenus pour le cas n° 5	132

4.6	:	Premier graphique des résultats obtenus pour le cas n° 6	135
4.7	:	Deuxième graphique des résultats obtenus pour le cas n° 6	136
4.8	:	Troisième graphique des résultats obtenus pour le cas n° 6	137
4.9	:	Premier graphique des résultats obtenus pour le cas n° 7	141
4.10	:	Deuxième graphique des résultats obtenus pour le cas n° 7	142
4.11	:	Troisième graphique des résultats obtenus pour le cas n° 7	143

NOMENCLATURE

ACPP	: Association canadienne des pâtes et papiers.
ANOVA	: Table de l'analyse de variance (ANalysis Of VAriance).
C.R.P.P.	: Centre de recherche en pâtes et papiers.
CCD	: Plan composite centré (Central Composite Design).
DL	: Nombre de degrés de liberté associés à une somme de carrés.
F	: Test d'hypothèse de Fisher (ex. : $F = \frac{MCR}{MCE}$).
GAMS	: Logiciel d'optimisation (programmation linéaire).
Lack of fit	: Manque d'ajustement du modèle ajusté.
MCE	: Moyenne des carrés associée à l'erreur totale ($MCE = \frac{SCE}{N - p}$).
MCR	: Moyenne des carrés associée à la régression ($MCR = \frac{SCR}{p}$).
n	: Nombre de points distincts du design global.
N	: Nombre total d'observations.
p	: Nombre de paramètres contenus dans le modèle ajusté.
PCTM	: Pâte chimicothermomécanique.
PFD	: Pâte de fibres désencrées.
PFR	: Pâte de fibres recyclées.
PK	: Pâte Kraft.
PKBF	: Pâte Kraft blanchie de feuillus.

PKBR	: Pâte Kraft blanchie de résineux.
PKSBR	: Pâte Kraft semi-blanchie de résineux.
PMM	: Pâte mécanique de meules.
PMMHP	: Pâte mécanique de meules haute pression.
PMMP	: Pâte mécanique de meules pressurisées.
PTHR	: Pâte au bisulfite à très haut rendement.
PTM	: Pâte thermomécanique.
R_A^2	: Coefficient de détermination ajusté ($R_A^2 = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{N}{N-p} \right)$).
R^2	: Coefficient de détermination ($R^2 = \frac{SCR}{STC}$).
SCD	: Plan centroïde simple (Simplex Centroid Design).
SCE	: Somme des carrés non expliquée ($SCE = \sum_{u=1}^N (Y_u - \hat{Y}_u)^2$).
SC_{EP}	: Somme des carrés de l'erreur pure ($SC_{EP} = \sum_{k=1}^n \sum_{u=1}^{r_k} (Y_{uk} - \bar{Y}_k)^2$).
SC_{MA}	: Somme des carrés du manque d'ajustement ($SC_{MA} = SCE - SC_{EP}$).
SCR	: Somme des carrés due à la régression ($SCR = \sum_{u=1}^N (\hat{Y}_u - \bar{Y})^2$).
STC	: Somme des carrés totale ($STC = \sum_{u=1}^N (Y_u - \bar{Y})^2$).
TAPPI	: The Association of Pulp and Paper Industry.
UQTR	: Université du Québec à Trois-Rivières.
X_1	: Nom de la variable de la PMM.
X_2	: Nom de la variable de la PTM.
X_3	: Nom de la variable de la PFD.
X_4	: Nom de la variable de la PKSBR.
\bar{Y}	: Moyenne des valeurs observées ($\bar{Y} = \frac{(Y_1 + Y_2 + \dots + Y_u + \dots + Y_N)}{N}$).
\bar{Y}_k	: Moyenne des r_k observations au k^e point de design.

- Y_u : Valeurs observées.
- \hat{Y}_u : Valeurs prédites par le modèle ajusté.
- Y_{uk} : La u^e observation au k^e point de design.
- Z_1 : Nom de la variable du grammage des formettes.
- Z_2 : Nom de la variable du raffinage de la PKSBR.

INTRODUCTION

Ces dernières années, l'utilisation de la pâte de fibres recyclées a connu une expansion remarquable. Cette situation a été provoquée par plusieurs facteurs tels que la crise nord-américaine des sites d'enfouissement, la disponibilité des fibres vierges, l'économie et l'opinion publique. Ces facteurs ont engendré de nouvelles législations dans plusieurs États américains. Pour la plupart, ces nouvelles lois n'affectent pas directement les producteurs de papier mais bien ceux qui l'utilisent comme les imprimeurs.

Donc, pour se plier aux nouvelles exigences du marché, les producteurs canadiens et américains doivent, à plus ou moins court terme, introduire des fibres recyclées dans leurs produits. La manière de se procurer cette nouvelle matière première varie d'un producteur à l'autre. Certains préfèrent produire eux-mêmes leur pâte de fibres recyclées tandis que d'autres ont opté pour l'achat de cette pâte.

Quelle que soit la stratégie utilisée par les différentes compagnies, le même problème subsiste : quels sont les impacts physiques et économiques de l'introduction de cette nouvelle fibre dans les mélanges destinés à la fabrication du papier journal ?

Pour répondre à cette question, nous allons dans un premier temps présenter quelques aspects théoriques concernant les mélanges en général. Pour appuyer la théorie, nous allons donc revoir les principales publications concernant l'influence de la pâte de fibres désencrées sur les propriétés papetières du papier journal. Nous allons aussi revoir celles concernant les mélanges de pâtes en général.

Dans un deuxième temps, nous présenterons l'approche expérimentale qui a été suivie au cours de ce projet. Cette approche peut se diviser en trois grandes parties. La première partie traite du choix des variables, la deuxième concerne l'élaboration du plan expérimental basé sur une méthode statistique et la troisième décrit la procédure expérimentale suivie en laboratoire.

Le troisième chapitre concerne la modélisation des propriétés papetières mesurées en laboratoire. On y retrouve un bref rappel de certains paramètres reliés aux statistiques de la modélisation. Les modèles obtenus pour les propriétés papetières que nous avons considérées (indice d'égouttage, indice d'éclatement, indice de déchirure, longueur de rupture, énergie absorbée à la rupture, longueur de rupture humide, énergie absorbée à la rupture humide, opacité et blancheur) sont présentés sous forme de table d'ANOVA.

Finalement, le dernier chapitre porte sur l'étape qui complète la modélisation soit celle de l'optimisation. Deux techniques d'optimisation y sont décrites soient une méthode qui s'effectue avec un logiciel spécialisé (méthode mathématique) et une

autre qui est plutôt une méthode graphique. Étant donné le nombre important de possibilités concernant l'optimisation de nos modèles, nous avons choisi de limiter notre étude à seulement deux mélanges populaires soient, en premier lieu, le mélange des pâtes PMM, PFD et PKSBR et, en deuxième lieu, le mélange des pâtes PTM, PFD et PKSBR. Pour chacun des deux mélanges, nous allons considérer différents scénarios de façon à explorer le potentiel qu'un travail comme celui-ci peut avoir.

CHAPITRE I

1. ASPECTS THÉORIQUES ET REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce premier chapitre a pour objet de faire le point sur les connaissances scientifiques disponibles concernant l'influence des fibres désencrées sur les propriétés papetières du papier journal. Le but de ce chapitre est aussi de faire le point sur ce qui a été fait jusqu'à présent sur les propriétés des mélanges de pâtes de type binaire, ternaire et même quaternaire destinés à la fabrication de papier journal.

Mais avant de se pencher sur les conséquences du recyclage sur l'industrie du papier journal, il faut revoir le contexte dans lequel les compagnies productrices se sont retrouvées vers la fin des années 80.

1.1 Législations et fibres recyclées

Plusieurs paliers de gouvernement américains se sont servis de leur système législatif respectif pour tenter de résoudre les problèmes concernant l'élimination des

déchets urbains. Le problème principal provient du fait qu'il existe à l'heure actuelle une pénurie de sites d'enfouissement qui soient relativement sécuritaires vis-à-vis de l'environnement et qui soient à proximité des centres urbains. Cette rareté relative dans les sites d'enfouissement a eu comme principal impact de faire grimper les coûts d'élimination des déchets solides. Certains gouvernements américains ont donc instauré de nouvelles lois incitant, directement ou indirectement, les fabricants de papier à incorporer une certaine proportion de fibres recyclées dans leurs produits. Le but de ces nouvelles législations est, évidemment, de diminuer la quantité de déchets solides à enfouir sans parler de l'impact positif sur l'environnement. En effet, plus on recycle de papier moins la superficie totale de forêt coupée est grande.

Ce qu'on entend par loi indirecte c'est le fait que des gouvernements ont choisi de légiférer plutôt au niveau des *transformateurs* du papier, par exemple, les imprimeurs, qu'au niveau des producteurs de papiers. Ce sont donc les transformateurs qui sont obligés de faire pression sur les fabricants de papier pour que ces derniers introduisent des fibres recyclées dans leurs produits. Bien que la proportion de fibres recyclées à introduire varie selon les lois et les produits, certaines lois exigent jusqu'à 40% de contenu en fibres recyclées.

1.2 Influences de la pâte de fibres désencrées sur l'industrie canadienne du papier journal

Pour l'industrie canadienne, cette situation a créé des remous très importants, particulièrement pour les fabricants de papier journal qui exportent la majeure partie de leur production aux États-Unis. En conséquence, pour préserver leur part de marché, les compagnies ont dû s'adapter plutôt rapidement pour s'assurer un approvisionnement fiable et de bonne qualité de cette nouvelle matière première qu'est la pâte de fibres recyclées (PFR) ou, dans le cas qui nous intéresse, la pâte de fibres désencrées (PFD). Les effets de la PFD sur les propriétés papetières du papier journal restent cependant à étudier puisqu'il existe à l'heure actuelle relativement peu de publications qui traitent de ce sujet.

Essentiellement, ce qu'il faut retenir, c'est le fait que les fabricants de papier journal se trouvent maintenant confrontés, malgré eux, à un nouveau composant, la PFD. Ceci a pour effet de bouleverser les recettes traditionnelles de fabrication du papier.

1.2.1 Situation précédant la venue de la pâte de fibres désencrées

Prenons le cas typique d'une usine qui fabrique son papier journal à partir de 3 pâtes différentes comme : la pâte mécanique de meules (PMM), la pâte au bisulfite à très haut rendement (PTHR) et la pâte kraft (PK). Si aucun changement n'est

apporté à la composition du mélange original, l'ajout de la PFD oblige donc l'usine à produire du papier journal à partir d'un mélange à 4 composants ou mélange quaternaire.

Le cas de cette usine n'est pas unique, plusieurs autres utilisaient déjà, avant l'avènement de la PFD, des mélanges de type ternaire. On peut citer comme autre exemple le mélange suivant : PMM, pâte thermomécanique (PTM) et PK.

Même si l'utilisation de plusieurs pâtes comporte certains avantages au point de vue des propriétés papetières, elle entraîne malheureusement des coûts de production plus élevés. De plus, l'addition d'une autre pâte (comme la PFD), dont le coût continue de s'accroître, n'améliorera certainement pas cette situation.

Les compagnies ont donc des choix importants à faire mais elles ne disposent pas de beaucoup de temps pour entreprendre des études poussées sur l'influence de la PFD sur les propriétés papetières du papier journal.

Il faut aussi ajouter que la prolifération croissante des usines de désencrage va entraîner et entraîne déjà une augmentation importante de la valeur marchande des vieux papiers, en plus d'une baisse éventuelle de leur qualité. Ceci a pour effet d'accroître la pression au niveau des usines pour qu'elles soutirent le maximum de la PFD et des autres pâtes pour minimiser les coûts de production tout en augmentant la qualité de leurs produits.

1.2.2 Situation actuelle

Les usines qui produisent de la PFD destinée à la production de papier journal n'utilisent pas toutes la même recette pour fabriquer cette pâte mais on peut dire qu'en général la PFD est composée d'environ 60 à 80 % de vieux journaux et complétée en majeure partie par de vieux magazines. La PFD est, par conséquent, une pâte qui possède normalement de bonnes propriétés de résistance mécanique puisque la diminution de la résistance mécanique due aux différentes étapes de recyclage et de désencrage est compensée en partie par l'ajout de fibres fortes provenant des vieux magazines. Ceux-ci sont habituellement fabriqués à partir de pâtes chimiques disposant de résistances mécaniques élevées.

D'autre part, on sait que certaines usines américaines réussissent depuis plusieurs années à produire du papier journal à partir de 100% de PFD. Ceci est cependant possible lorsque la matière recyclée disponible est de bonne qualité et qu'elle peut être obtenue à bon marché. Pour l'industrie canadienne, la fabrication de papier journal à partir de 100% de PFD semble difficilement envisageable puisque le coût actuel de production de la PFD est beaucoup plus élevé que celui des pâtes mécaniques comme la PMM et la PTM. Il faut également préciser que le coût de production de la PFD est toujours en progression en raison de la demande grandissante pour cette nouvelle matière première. La fabrication de papier à proportion élevée de PFD peut aussi présenter des inconvénients qui sont dûs aux effets à long terme du recyclage intensif du papier.

1.3 Effets du recyclage sur les propriétés papetières de la pâte de fibres désencrées

L'inconvénient majeur du recyclage continu est que les effets à long terme sur les fibres dûs au vieillissement ne sont pas encore entièrement connus. Les facteurs du vieillissement sont l'entreposage, les conditions de blanchiment et ainsi que de celles de la remise en pâte. Celles-ci ne sont que quelques étapes importantes dans le processus de recyclage. Chatterjee (1) rapporte que des pâtes comme la PK, la PTHR et la PTM se comportent de manière très différente lorsqu'elles sont soumises aux mêmes conditions de recyclages répétitifs. Ceci a pour effet de compliquer le problème de l'influence de la PFD sur les propriétés papetières des mélanges de pâtes puisque cette influence évoluera peut-être à mesure que le recyclage intensif du papier se poursuivra. En effet, à mesure que la proportion de papier recyclé augmentera, la proportion de fibres qui auront été recyclées plusieurs fois augmentera aussi.

De plus, la rareté relative de la matière première continuera à s'intensifier au fur et à mesure que de nouvelles installations de désencrage démarreront. En plus des prix qui continueront à grimper, les compagnies devront employer des papiers de types différents dans leur recette de fabrication de la PFD. La qualité de celle-ci dépendra donc de la qualité de ces nouvelles sources de vieux papiers.

Compte tenu de ce qui précède, deux questions s'imposent. Quels sont les effets de la PFD sur les propriétés papetières du papier journal ? Et, comment peut-on optimiser les propriétés papetières des mélanges complexes de pâtes pour papier journal ? Nous tenterons de répondre à ces questions dans les prochaines sections.

1.4 Effets de la pâte de fibres désencrées sur les propriétés papetières du papier journal

Les connaissances scientifiques actuelles sous forme de publications sont très limitées concernant ce sujet. Il est fort probable que des données existent mais que les compagnies les conservent pour leurs propres besoins. Cette affirmation est particulièrement vraie dans le cas de la PFD qui est en fait une nouvelle *technologie de pointe* pour l'industrie des pâtes et papiers. Les compagnies sont donc moins enclines à divulguer de l'information aussi importante.

Parmi les études publiées concernant l'introduction de PFD dans les mélanges pour papier journal, on note celle de Lippert et al (2). Le but de leurs travaux effectués en laboratoire était de remplacer entièrement la PMM par de la pâte mécanique de meules haute pression (PMMHP) et d'augmenter la proportion de PFD de façon à diminuer l'apport en fibres dispendieuses comme celles provenant de la pâte kraft semi-blanchie de résineux (PKSBR). À cette fin, ils ont choisi comme mélange de référence, un mélange de 46% de PMM, de 40% de PFD et de 14% de PKSBR. Cette combinaison est actuellement employée industriellement par une

usine européenne de papier journal. Il est à noter que leur PFD possédait une résistance mécanique élevée et des propriétés optiques faibles. En tenant compte des pâtes qu'ils ont utilisées et de leurs caractéristiques, ils ont pu produire des formettes de laboratoire contenant jusqu'à 66% de PFD avec seulement 2% de PKSBR (le reste étant de la PMMHP). Les propriétés papetières obtenues étaient comparables à celles du mélange de référence. Ces auteurs indiquent finalement qu'une tonne de papier journal produite avec de la PFD et de la PMMHP nécessite beaucoup moins d'énergie et de bois que du papier fabriqué à partir de 100% de fibres vierges. Ces auteurs ne précisent malheureusement pas la façon dont les propriétés papetières des pâtes vierges se comportent (relation d'additivité ou non) lorsqu'elles sont mélangées ensemble.

D'autres auteurs (3) ont effectué des mélanges de différentes qualités de PFD avec de la PTM. L'analyse des résultats de cette étude a été effectuée en utilisant des modèles statistiques complets. Ce qu'il faut retenir de cette étude est que l'introduction de PFD dans le mélange n'a pas eu d'impact significatif sur l'indice d'égouttage, l'indice d'éclatement, la longueur de rupture et la blancheur. L'indice de déchirure a subi, quant à elle, une légère diminution de 5% au plus tandis que la main a diminué de façon significative à mesure que le contenu en PFD a augmenté.

Des résultats similaires ont aussi été obtenus lors d'essais effectués au Centre de Recherche en Pâtes et Papiers (C.R.P.P.) de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) dans le cadre d'une commandite qui mettaient aussi en cause

la PTM et la PFD. Tout comme l'étude précédente (3), des modèles statistiques ont été développés pour analyser les résultats obtenus. À partir de ces modèles statistiques, il n'a pas été possible d'en arriver à des conclusions intéressantes concernant l'influence de chacune des 2 pâtes sur les propriétés papetières des mélanges.

Ces derniers résultats s'expliquent en comparant, une par une, les propriétés de chaque pâte. Les pâtes, PFD et PTM, étaient en fait pratiquement identiques du point de vue des propriétés. Ce qui explique d'une certaine façon qu'il est possible de fabriquer du papier journal à partir de 100% de PFD (4) puisqu'on sait que quelques usines produisent actuellement du papier journal à partir de 100% de PTM (2). Il arrive dans certains cas qu'un faible pourcentage de PK soit ajouté au mélange pour renforcer le papier.

Bien que, la qualité de la PFD varie d'une compagnie à l'autre, on remarque que l'incorporation de PFD dans les mélanges à papier journal ne devrait pas présenter trop de problèmes au niveau des propriétés papetières. Il n'est cependant pas garanti que l'utilisation de la PFD sur les machines à papier ne posera pas d'inconvénient en ce qui a trait au fonctionnement des machines comme tel. Il faut plutôt s'attendre au contraire.

Par ailleurs, même dans les cas où la qualité de la PFD est satisfaisante, le problème de l'optimisation des mélanges complexes de pâtes comme les mélanges

ternaires et quaternaires demeure. La section suivante résume les connaissances disponibles concernant les propriétés des mélanges de pâtes ainsi que celles concernant les méthodes d'optimisation.

1.5 Optimisation des mélanges de pâtes

La popularité de la fabrication de papier journal et autres produits papetiers à partir de mélanges composés de plusieurs pâtes provient du fait que chaque type de pâte possède une particularité intrinsèque qui dépend, entre autres, du procédé de mise en pâte. L'utilisation de plusieurs pâtes permet donc de bénéficier des propriétés particulières de chacune des pâtes, c.-à-d. que chaque pâte n'a souvent qu'une ou deux propriétés supérieures aux autres.

Prenons par exemple, le cas du mélange traditionnel (PMM et PK). Celui-ci a été beaucoup utilisé, même jusqu'à très récemment et sert encore aujourd'hui comme mélange de référence (4,5,6). Ce mélange a été très populaire parce qu'il était composé de deux championnes soient la PMM, pour son opacité exceptionnelle et la PK, pour ses propriétés mécaniques nettement supérieures.

Cependant l'utilisation de plusieurs pâtes comporte quelques inconvénients. Il y a, tout d'abord, l'augmentation des coûts de production qui peut résulter entre autres de l'exploitation de plusieurs procédés différents de mise en pâte et du coût d'achat élevé des pâtes chimiques comme la PK qui servent généralement de renfort

au niveau des propriétés mécaniques. Ensuite, l'optimisation des mélanges à composants multiples comme les mélanges ternaires et quaternaires devient très difficile à effectuer.

L'optimisation des mélanges est en général un domaine très complexe. Il faut tout considérer en même temps : les composants de départ pris individuellement, les interactions possibles entre ces composants et il ne faut surtout pas oublier l'aspect économique qui permet de jauger le travail d'optimisation qui a été effectué.

L'optimisation individuelle des composants en fonction d'une ou plusieurs propriétés importantes (qui sont généralement différentes pour chaque composant) peut normalement être facilement effectuée. Cependant cette étape, qui peut contribuer à améliorer le mélange final, ne permettra pas nécessairement d'obtenir le mélange optimal en fonction des capacités globales des composants utilisées. Ceci est particulièrement vrai lorsqu'il existe des interactions entre les composants du mélange.

D'ailleurs, Lindholm (7) a pu déterminer, à partir de travaux effectués sur des mélanges de fractions de fibres, que les propriétés du papier ne peuvent pas être prédites directement à partir des propriétés des fractions isolées de fibres à cause des effets synergiques entre les fibres de différentes grosseurs et différentes formes. Cet auteur a réalisé une série de travaux intensifs sur les contributions de diverses fractions de pâtes aux propriétés des pâtes entières. Le fractionnement des pâtes

(PTM, PMM et PMM pressurisée (PMMP)) s'est effectué en trois parties : fibres grossières, fibres moyennes et fibres fines.

1.5.1 Interactions entre les composants d'un mélange

Ce sont les interactions entre les composants des mélanges qui compliquent l'optimisation des mélanges. La figure 1.1 illustre ce que le degré d'interaction peut occasionner au niveau des propriétés d'un mélange simple soit un mélange binaire. Le cas où il n'y a pas ou peu d'interactions entre les 2 composants *A* et *B* est indiqué par la ligne pointillée. L'addition de *B*, qui dans cet exemple possède une propriété *Y* supérieure à *A*, entraîne un changement linéaire de la propriété *Y* jusqu'à la valeur de celle de *B* à 100%. On dit alors que ces composants possèdent entre eux une relation linéaire d'additivité.

Les courbes *déviati on positive* et *déviati on négative* montrent ce qui arrive lorsque les composants d'un mélange dévient d'une relation linéaire d'additivité. Pour la déviati on positive, l'addition du composant *B* entraîne une augmentation plus rapide de la propriété *Y* que la relation linéaire (ligne pointillée) tandis que pour la déviati on négative, l'addition de *B* entraîne une augmentation moins rapide de la propriété *Y* que la relation linéaire d'additivité.

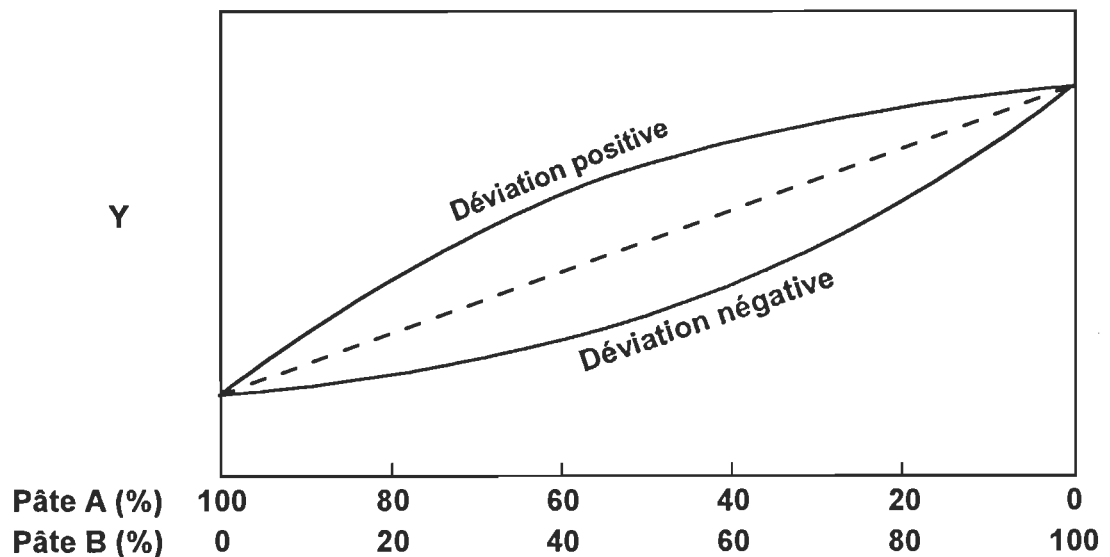


Fig. 1.1 : Interactions entre les composants d'un mélange binaire

Le cas de la déviation positive peut être très bénéfique dans plusieurs situations puisque l'effet de B se fait sentir rapidement même à faible pourcentage dans le mélange. Si, par exemple, le composant B coûte plus cher que A et que la valeur de la propriété Y de A est légèrement inférieure à une valeur de référence donnée, alors il suffit seulement d'ajouter une faible quantité de B pour atteindre la valeur minimale pour Y . La quantité de B à ajouter sera plus faible pour la déviation positive que pour la relation linéaire. Le mélange caractérisé par une déviation positive coûtera donc moins cher à produire que s'il était caractérisé par une relation linéaire d'additivité.

Par contre, la déviation négative peut représenter un désavantage. Si on reprend l'exemple précédent, il faudrait augmenter substantiellement la proportion

de B pour rencontrer la norme pour Y . Ceci implique qu'il en coûterait plus cher pour produire ce mélange.

La figure 1.1 illustre le comportement des mélanges de seulement 2 composants. Le comportement des mélanges ternaires et quaternaires est beaucoup moins évident à déterminer puisque des interactions peuvent exister entre non-seulement 2 composants mais bien entre tous les composants. Il est bon de rappeler ici qu'une machine produisant un grade de papier quelconque avec une recette de pâte ne comprenant que 2 pâtes vierges (ex. : PMM et PK) doit inclure un troisième composant qui est la pâte cassée, c.-à-d. la pâte qui a déjà circulé sur la machine. La proportion de cette pâte peut varier généralement de 15 à 25% mais étant donné que ce sont des essais en laboratoire que nous avons effectués, nous n'avons pas inclus cette pâte dans notre étude. De plus, le problème se complique si on ajoute au système les variables associées à l'optimisation individuelle des composants. Ces variables s'appellent variables de procédés.

La principale préoccupation de l'industrie des pâtes et papiers, ce sont les effets des différentes pâtes sur les propriétés mécaniques et optiques associés aux mélanges.

1.5.2 Comportement des propriétés structurales des mélanges

Les propriétés structurales du papier comme la densité apparente et le volume spécifique permettent souvent d'évaluer qualitativement les caractéristiques du papier final. Par exemple, la rigidité de la feuille est une fonction du volume spécifique par l'effet de poutre (8). Une certaine rigidité est nécessaire lors des opérations générales d'impression et aussi pour faciliter la manipulation du papier. Ce sont les pâtes mécaniques qui donnent une rigidité plus élevée à la feuille à cause de leur volume spécifique supérieur. En outre, plus celui-ci est élevé, plus l'influence sur la feuille est grande.

Par ailleurs, la densité apparente est une mesure, entre autres, de la conformité du papier (5,7,8) et on peut donc, indirectement, caractériser la cohésion interne et la résistance superficielle de la feuille à partir de la densité. Plus la densité apparente est élevée, plus la conformité, la cohésion interne et la résistance superficielle du papier seront aussi élevées.

D'autre part, Lindholm (9) indique que la seule propriété qui soit une combinaison linéaire par poids des propriétés individuelles des composants est le volume spécifique.

Par contre, Mohlin (10), qui a travaillé sur les mélanges de pâtes mécaniques et de pâte kraft, a observé plutôt une déviation négative de la relation linéaire

d'additivité (voir fig. 1.1) pour des propriétés comme le volume spécifique et la densité apparente. Cette observation est appuyée par les résultats obtenus par Brecht (11). Celui-ci a remarqué que plus les pâtes des mélanges sont différentes au niveau de leurs propriétés papetières, plus les propriétés du mélange dévient de la relation linéaire d'additivité.

1.5.3 Comportement des propriétés mécaniques des mélanges

Le comportement des propriétés mécaniques du papier est d'une importance primordiale à plusieurs niveaux. Le procédé de fabrication du papier, les diverses méthodes d'impression et sans oublier les lecteurs eux-mêmes exigent que les propriétés de résistance, qu'elles soient à l'état humide ou sec, soient suffisantes pour satisfaire leurs besoins respectifs.

C'est pourquoi, on utilise depuis longtemps des mélanges de pâtes pour fabriquer du papier et en particulier le papier journal. En utilisant les mélanges, on essaie de tirer le maximum des particularités de chacun des composants. Les recettes varient d'une compagnie à l'autre, et même d'une usine à l'autre à l'intérieur d'une même compagnie.

En ce qui concerne le papier journal, et autres grades similaires, toutes les usines ont les mêmes objectifs soient de produire une feuille de papier ayant une opacité élevée et une résistance adéquate à l'état sec pour être utilisée sur des

presses d'imprimerie à haute vitesse (12). Pour rencontrer les exigences du marché, les usines disposent de toute une armée de pâtes possédant chacune ses avantages et ses désavantages. On peut répartir ces pâtes en deux grandes classes soient les pâtes chimiques et les pâtes mécaniques. Généralement, les pâtes chimiques se caractérisent par leur résistance mécanique élevée tandis que les pâtes mécaniques sont plutôt renommées pour leur opacité supérieure.

Ces deux classes de pâtes fournissent donc les 2 principales caractéristiques recherchées pour fabriquer un produit de haute qualité. Cependant, le choix des 2 ou 3 pâtes à introduire dans le mélange et, sans oublier, la recette optimale du mélange sont difficiles à déterminer. De plus, la stabilité dans la qualité des pâtes est primordiale si on désire que le travail d'optimisation qui sera éventuellement effectué puisse être valide pendant une période assez longue.

Plusieurs auteurs (5,10,11,13-19) qui ont travaillé sur des mélanges de pâtes chimiques et mécaniques s'accordent généralement pour dire que le comportement des mélanges dévie de la relation linéaire d'additivité. Cette déviation s'accroît d'autant plus que les propriétés papetières des pâtes considérées sont très différentes.

Bousquet (20), qui a effectué une étude systématique basée sur une méthode statistique, n'a pas non plus relevé de relation d'additivité pour des mélanges de PTM, de pâte kraft blanchie de résineux (PKBR), de pâte au sulfite blanchie de

résineux (PSBR) et de pâte kraft blanchie de feuillus (PKBF). Ses essais ont été effectués à l'aide d'une formette dynamique.

Quelques auteurs (4,7,10,15) ont cependant remarqué que pour une plage restreinte, c.-à-d. jusqu'à 30% de pâte chimique, il est possible de considérer une certaine additivité des propriétés mécaniques des composants. Pour leur part, Mohlin (7) et Smook (15) ont suggéré l'équation suivante pour exprimer l'additivité pour la plage de 0 à 30% de pâte chimique. La figure 1.2 illustre le comportement observé par les auteurs. La ligne pointillée représente la relation linéaire d'additivité telle que vue précédemment tandis que la ligne pleine représente les propriétés mécaniques réelles.

$$P_{mél.} = \{x_1 P_1 + x_2 P_2 + \dots + x_n P_n\}_{p.méca.} + \{A_c x_c P_c\}_{p.chim.}$$

où les indices 1, 2, ..., n représentent les pâtes mécaniques; l'indice c, la pâte chimique; les x, les fractions massiques avec $x_c \leq 30\%$; le A, le coefficient de correction.

Horn (4), qui a travaillé avec de la pâte chimicothermomécanique (PCTM) de kenaf et avec de la PFD, a, pour sa part, constaté une relation d'additivité pour l'indice d'éclatement et la longueur de rupture pour toute la plage, c.-à-d. de 0 à 100%. Il a effectué ses essais sur une machine pilote.

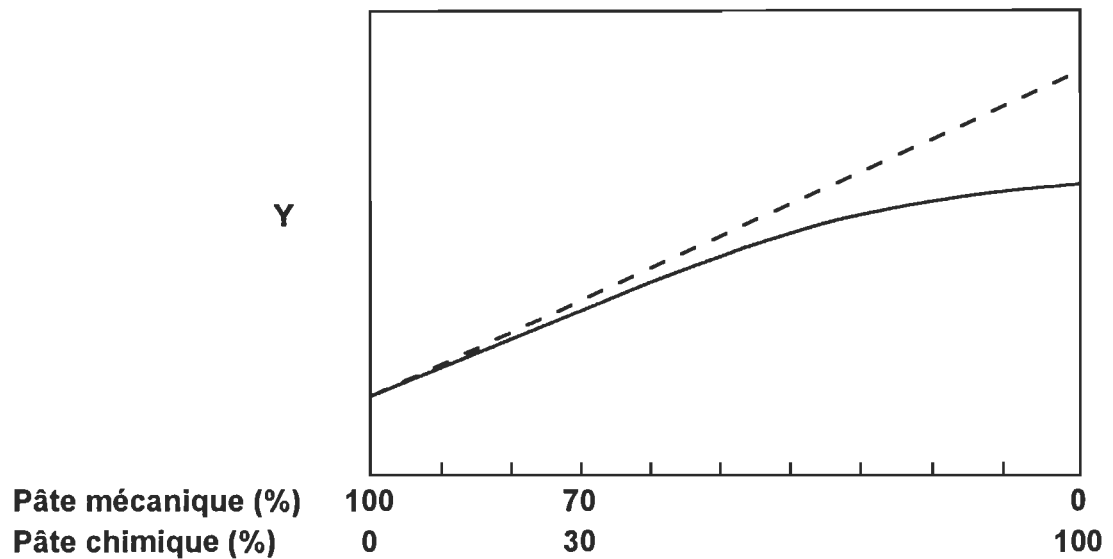


Fig. 1.2 : Relation entre pâtes mécaniques et pâtes chimiques

Par ailleurs, Mohlin (10) a aussi constaté que la plupart des pâtes mécaniques semblent interagir avec les pâtes chimiques d'une façon similaire, indépendamment de la distribution en grosseur et la capacité de liaison des particules des pâtes mécaniques.

Une autre étude (21) indique, quant à elle, que les propriétés mécaniques comme la déchirure, l'éclatement et la traction décroissent linéairement à mesure que le grammage diminue.

1.5.4 Comportement des propriétés optiques des mélanges

Comme pour les propriétés mécaniques, les deux classes de pâtes (chimiques et mécaniques) présentent une variété de niveaux de propriétés optiques. Les

fabricants de papier disposent donc à nouveau d'une banque de pâtes qui peuvent les aider à rencontrer les exigences de l'industrie.

Les pâtes chimiques sont généralement produites à des degrés de blancheur supérieurs à ceux des pâtes mécaniques tandis que celles-ci sont caractérisées par des niveaux d'opacité et de pouvoirs de diffusion lumineuse nettement supérieurs à ceux des pâtes chimiques.

Brecht (11) a rapporté, dans une étude effectuée sur les effets du mélange de différentes pâtes sur les propriétés physiques des papiers, que l'opacité et la blancheur réagissent de la même façon lorsque deux pâtes sont mélangées ensemble. C'est toujours la pâte la plus sombre qui s'impose sur les propriétés optiques finales du mélange. La théorie qui prédit une certaine déviation négative de la linéarité ne prédit cependant pas précisément ce qui se passe en réalité. Comme on peut le voir sur la figure 1.3, la courbe des valeurs mesurées pour la blancheur est plus accentuée que la courbe théorique, ce qui indique une déviation négative plus forte que la théorie. La figure 1.4, quant à elle, montre le comportement de l'opacité qui est plutôt une déviation positive. Ce qui explique que l'ajout d'une bonne proportion de PK dans un mélange PMM et PK renforce la feuille sans trop affecter l'opacité finale du papier.

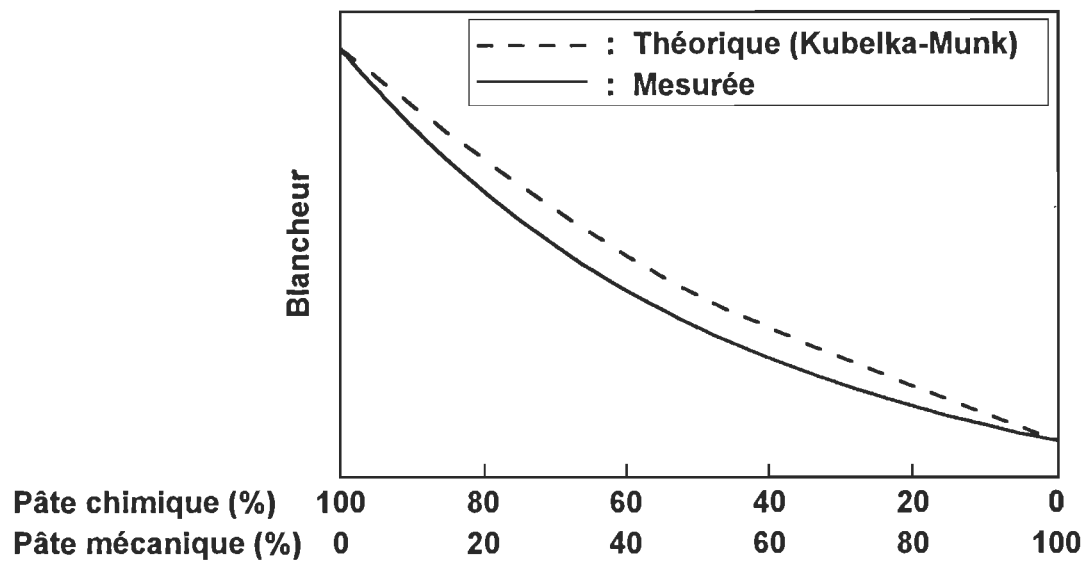


Fig. 1.3 : Comportement de la blancheur dans un mélange binaire

Whiting (22) qui a étudié la prédiction de la blancheur des mélanges a montré que les coefficients de diffusion (S) et d'absorption (K) semblent se combiner linéairement quand des échantillons blanchis ou non-blanchis d'une même pâte sont mélangés ensemble. Les équations suivantes dérivées de la théorie de Kubelka-Munk prédisent d'une façon précise la blancheur finale du mélange résultant. Par contre, ni S ni K semblent se combiner linéairement lorsque ce sont des pâtes de types différents qui sont mélangées ensemble.

$$S_{mél} = x_1 S_1 + x_2 S_2 + \dots + x_n S_n$$

$$K_{mél} = x_1 K_1 + x_2 K_2 + \dots + x_n K_n$$

où x représente la fraction massique associée à la pâte n .

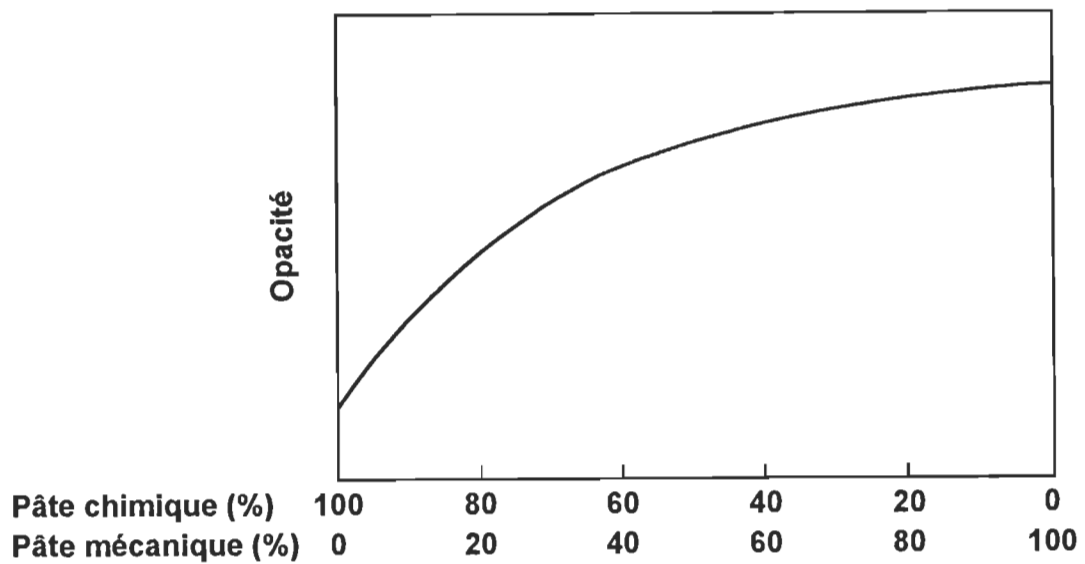


Fig. 1.4 : Comportement de l'opacité dans un mélange binaire

Les pâtes mécaniques comme PMM et PTM, si on exclut les matières non-fibreuses, sont donc nécessaires à l'obtention d'une opacité élevée dans un mélange pour papier journal. Elles donnent, en effet, au papier une opacité supérieure en raison du fort pouvoir de diffusion de la lumière de leurs fines (8). Par contre, elles augmentent les problèmes de réversion de couleur, ce qui n'est cependant pas un inconvénient majeur pour les produits à durée de vie limitée comme le papier journal.

De plus, contrairement aux propriétés structurales et mécaniques énoncées par (21), l'opacité présente une dépendance non-linéaire par rapport au grammage. Ceci signifie que l'opacité diminue de plus en plus rapidement à mesure que le grammage décroît. Il faut aussi ajouter que la réduction de l'opacité a un impact majeur sur l'imprimabilité du papier. Dans cette étude, on rapporte aussi que la

concordance des résultats recueillis est très bonne si on compare les données pour un papier journal commercial et celles pour des formettes standards.

La dépendance non-linéaire de l'opacité envers le grammage peut facilement être constatée en analysant l'équation de Kubelka-Munk (21) définissant l'opacité. De cette équation, il faut remarquer le terme $\coth(bSw)$ où la variable qui nous intéresse est w représentant le grammage. La fonction cotangente hyperbolique étant une fonction non-linéaire, il devient évident que l'opacité est une fonction du grammage. La fonction \coth est aussi une fonction exponentielle, ce qui peut accentuer la variation de l'opacité en fonction du grammage comme constaté par Ionides (21).

$$\text{opacité} = \frac{1}{R_{\infty}} (a + b \cdot \coth(bSw))$$

Essentiellement, ce qu'on peut retenir des mélanges de pâtes, c'est que la plupart des propriétés papetières sont caractérisées par un comportement qui dévie de la relation linéaire d'additivité. Ce comportement est amplifié lorsque les pâtes employées diffèrent beaucoup les unes des autres.

L'optimisation des mélanges, qui est déjà rendue difficile par les interactions existant entre les pâtes, est aussi compliquée par le fait que chaque pâte est généralement supérieure dans une ou deux catégories seulement. Prenons par exemple, la PMM, elle est la championne incontestée de l'opacité. Par contre, ses

propriétés mécaniques sont plutôt faibles. L'optimisation peut devenir encore plus complexe si on ajoute des variables de procédés comme le raffinage, des traitements chimiques et le grammage. Ce dernier, bien que son effet sur les propriétés physiques soit plutôt simple (linéaire), a un effet important sur l'opacité. Celle-ci tend à diminuer de plus en plus rapidement à mesure que le grammage diminue. L'opacité étant une propriété très importante et qui tend à diminuer avec les années (21), le grammage devrait donc être considéré dans la procédure de l'optimisation.

CHAPITRE II

2. ÉLABORATION DE LA PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Notre travail de recherche, comme la plupart des travaux similaires, doit rencontrer au moins deux objectifs généraux :

1. déterminer et quantifier la relation entre les valeurs d'une ou plusieurs réponses mesurables et les arrangements d'un groupe de facteurs expérimentaux qui affectent présumément les mesures expérimentales ou réponses;
2. trouver l'arrangement des facteurs expérimentaux qui produit la meilleure valeur et le meilleur jeu de valeurs de la ou des réponses.

Les réponses mesurables correspondant à notre domaine d'étude sont les propriétés papetières qui sont, pour la plupart, normalisées. Nous disposons en gros de trois types de propriétés papetières. Il y a, tout d'abord, les propriétés structurales comme la densité. On a, ensuite, les propriétés mécaniques comme la

résistance au déchirement. Et, finalement, il y a les propriétés optiques comme l'opacité.

Les facteurs expérimentaux disponibles pour étudier un phénomène peuvent être très nombreux. Parmi ces facteurs, citons les quelques dizaines de pâtes disponibles dans l'industrie des pâtes et papiers, les quelques dizaines de conditions de cuisson, de blanchiment et même de travail mécanique, sans oublier les quelques dizaines d'espèces de bois.

De ce qui précède, on réalise facilement que les deux objectifs énoncés précédemment peuvent parfois être très difficiles à atteindre. Le choix des facteurs expérimentaux constitue donc une étape très importante dans tout travail de recherche. Quelquefois, quand le nombre de facteurs expérimentaux est élevé, il devient essentiel d'ajouter une étape préliminaire appelée tamisage. En effet, avant d'entreprendre l'étude proprement dite et de réaliser des dizaines de manipulations en laboratoire, il faut s'assurer que les variations de niveaux des facteurs expérimentaux produiront un effet mesurable sur les réponses considérées. Une recherche bibliographique approfondie permet souvent d'éliminer quelques facteurs ou, à tout le moins, de fixer le niveau (valeur) de certains facteurs indispensables pour réaliser les manipulations.

Par ailleurs, le choix des réponses à mesurer est aussi une étape importante du travail de recherche puisqu'elles nous permettent de mesurer les phénomènes physiques qui se produisent lorsque les différents facteurs expérimentaux varient. Il s'agit de s'assurer que les réponses mesurées permettront d'expliquer le mieux possible les phénomènes physiques en cause sans vouloir tout mesurer à la fois. Examinons donc pour commencer le choix des réponses à mesurer ou, plus précisément, le choix des essais papetiers à réaliser.

2.1 Choix des essais papetiers à réaliser

Au premier chapitre, nous avons pu constater que ce sont les propriétés comme la résistance au déchirement et la résistance à la traction (état sec et humide), et l'opacité qui sont déterminantes pour l'industrie du papier journal. Si on oublie pour l'instant la résistance à la traction du papier à l'état humide, les propriétés (résistance au déchirement et à la traction et, l'opacité) ainsi que quelques autres sont aisément déterminées à partir d'une même formette de pâte. La liste des propriétés papetières évaluées à partir d'une formette de pâte dans le cadre de notre étude est la suivante :

1. grammage;
2. volume spécifique et densité apparente;
3. degré de blancheur;

4. opacité;
5. coefficients de diffusion et d'absorption;
6. résistance à l'éclatement;
7. résistance au déchirement;
8. résistance à la traction;
9. allongement à la rupture;
10. énergie absorbée à la rupture (TEA).

Les méthodes ou essais normalisés associés à ces propriétés papetières sont présentés, entre autres, au tableau 2.1. Nous avons indiqué pour chaque méthode de travail les normes canadiennes (ACPP) et américaines (TAPPI) équivalentes.

Méthodes	Norme ACPP	Norme TAPPI
Indice d'égouttage des pâtes	C.1	T 227 om-85
Préparation des formettes de pâte destinées aux essais papetiers	C.4	T 205 om-88
Enlèvement de la latence (méthode de Domtar)	C.8P	T 262 om-89
Classification Bauer-McNett	n.d.	T 233 cm-82
Grammage des formettes	D.3	T 410 om-88
Épaisseur moyenne des formettes	D.4	T 411 om-89
Résistance à l'éclatement	D.8	T 403 om-85
Résistance au déchirement	D.9	T 414 om-88
Préparation des éprouvettes destinées aux essais physiques	D.12	T 220 om-88
Consistance des suspensions de pâte	D.16	T 240 om-88
Essai de traction des éprouvettes à l'état sec	D.34	T 494 om-88
Essai de traction des éprouvettes à l'état humide	n.d.	n.d.
Degré de blancheur des formettes	E.1	T 452 om-87
Opacité des formettes	E.2	T 425 om-86 T 519 om-86
Humidité des formettes	G.3	T 412 om-90

Tableau 2.1 : Méthodes normalisées

Tel qu'indiqué dans le tableau, il n'existe pas de méthode normalisée pour effectuer les essais de traction du papier à l'état humide. La méthode employée est présentée à l'annexe A. Cette méthode est une adaptation d'une procédure publiée (24) par une équipe de travail de l'Institut de recherche en pâtes et papiers du Canada (PAPRICAN).

Les autres méthodes normalisées qui se retrouvent au tableau 2.1 et qui permettent de caractériser soit les fibres ou soit le papier sont l'indice d'égouttage et la classification Bauer-McNett. L'indice d'égouttage sera repris plus loin à la section 2.4 dans la description de la procédure expérimentale. De son côté, la classification Bauer-McNett ne servira qu'à caractériser les pâtes vierges. Parmi les propriétés papetières évaluées à l'aide des méthodes normalisées, seulement 4 sont fournies directement par l'appareil de mesure et n'ont ainsi pas besoin d'être transformées. Celles-ci sont présentées avec leurs unités respectives dans le tableau 2.2.

Propriété	Unités
Allongement à la rupture	[%]
Énergie absorbée à la rupture (TEA)	[g/cm]
Degré de blancheur	[%]
Opacité	[%]

Tableau 2.2 : Propriétés papetières directement mesurées

Les deux premières propriétés du tableau 2.2 sont déterminées lors des essais de traction sur les éprouvettes à l'état sec et à l'état humide à l'aide de l'appareil à vitesse constante d'allongement de la compagnie Instron. Cet appareil donne aussi la charge à la rupture. Cette dernière valeur entre dans le calcul de la longueur de rupture tel que montré au tableau 2.3. Les deux autres propriétés

(degré de blancheur et opacité) sont obtenues à l'aide de l'appareil Technibrite. Celui-ci donne aussi les pouvoirs de diffusion et d'absorption qui servent au calcul des coefficients de diffusion et d'absorption de la lumière. Les autres propriétés papetières évaluées dans ce travail nécessitant une certaine transformation (colonne *Équation*) sont aussi présentées au tableau 2.3. Cette transformation permet dans la plupart des cas d'introduire le grammage et aussi d'effectuer un changement d'unités.

Propriété	Équation	Unités
Grammage	$\frac{\text{masse de 5 feuilles [g]} \cdot \text{siccité [\%]}}{10}$	$\left[\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right]$
Volume spécifique	$\frac{\text{épaisseur moyenne [mm]} \cdot 1000}{\text{grammage} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right]}$	$\left[\frac{\text{cm}^3}{\text{g}} \right]$
Densité apparente	$\frac{1}{\text{volume spécifique}}$	$\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$
Indice d'éclatement	$\frac{\text{éclatement moyen [kPa]}}{\text{grammage} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right]}$	$\left[\frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^2}{\text{g}} \right]$
Indice de déchirure	$\frac{\left(\frac{\text{déchirure moyenne [g]} \cdot 16}{\text{nombre de plis}} \right) \cdot 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]}{\text{grammage} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right]}$	$\left[\frac{\text{mN} \cdot \text{m}^2}{\text{g}} \right]$
Longueur de rupture	$\frac{\text{charge maximum [kg]} \cdot 1000}{15 \cdot \text{grammage} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right]}$	[km]
Coefficient de diffusion	$\frac{\text{pouvoir de diffusion} \cdot 1000 \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right]}{\text{grammage} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right]}$	$\left[\frac{\text{m}^2}{\text{kg}} \right]$
Coefficient d'absorption	$\frac{\text{pouvoir d'absorption} \cdot 1000 \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right]}{\text{grammage} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right]}$	$\left[\frac{\text{m}^2}{\text{kg}} \right]$

Tableau 2.3 : Propriétés papetières calculées

2.2 Choix des variables de design

Comme mentionné au chapitre I, l'optimisation d'un mélange peut s'effectuer en considérant plusieurs facteurs. D'une part, on a les composants du mélange et d'autre part, on a des variables de procédé qui peuvent être plus ou moins associées aux composants. On pourrait, par exemple, tenir compte des conditions de cuisson d'une pâte Kraft.

Examinons, en premier lieu, le cas des composants du mélange.

2.2.1 Choix des composants du mélange

La première pâte à inclure dans notre mélange de base est la PFD puisqu'elle constitue l'essence même de ce projet. Parmi les autres pâtes souvent citées au chapitre I, nous avons la PMM et la PK. Celles-ci ont formé un mélange très populaire pendant plusieurs années. Bien que ce mélange binaire ne soit plus aussi populaire qu'il ne l'a été, les deux pâtes constituent encore des composants de choix dans la fabrication du papier journal car ce sont en fait deux championnes. La PMM est excellente au point de vue de l'opacité tandis que la PK possède la meilleure résistance mécanique.

Une autre pâte dont il a été question dans le premier chapitre est la PTM. Celle-ci est en effet considérée par (12) comme le choix logique du futur car il est possible de fabriquer du papier journal de qualité à partir de 100% de PTM. Cette pâte allie donc bonne opacité et bonne résistance mécanique. Toutefois, on sait que plusieurs usines ajoutent une faible quantité de PK à leur mélange pour obtenir de meilleures propriétés mécaniques. Ceci s'explique par le fait que chaque usine possède ses propres conditions de raffinage. La matière première varie aussi d'une usine à l'autre. Par ailleurs, il faut ajouter que la venue de la PFD préviendra peut-être l'addition de PK dans les mélanges. En effet, la PFD est souvent composée en bonne proportion de fibres chimiques résistantes puisqu'elle est fabriquée généralement de 30 à 40% de vieux papiers genre magazine.

Il existe plusieurs autres pâtes qui auraient pu être considérer dans notre travail mais ces 4 pâtes (PFD, PMM, PTM et PK) nous permettront d'imaginer plusieurs scénarios et de les comparer. Il faut aussi spécifier que des variables de type procédé seront également incluses dans le plan expérimental. Ceci contribuera à augmenter sensiblement le nombre de manipulations à réaliser en laboratoire. Il faut se rappeler que le but de ce travail n'est pas d'évaluer tous les mélanges possibles de papier journal mais bien de s'attaquer à quelques cas industriels rencontrés quotidiennement et de développer une méthode de modélisation et d'optimisation.

En choisissant la PMM et la PK, on jette un coup d'oeil sur le passé, c.-à-d. que l'on considère le cas des usines qui opèrent encore leur vieux procédé de mise en pâte de type mécanique de meules. Celles-ci doivent donc nécessairement ajouter une pâte forte à leur mélange pour renforcer la résistance mécanique de leur papier. Bien qu'il existe plusieurs pâtes disponibles pour accomplir cette tâche, nous avons choisi la PKSBR parce qu'elle est utilisée industriellement. De plus, l'usine de la compagnie Produits Forestiers Canadien Pacifique à La Tuque (maintenant Cartons St-Laurent) pouvait nous procurer facilement cette pâte.

Par ailleurs, le choix de la PTM, sans oublier la PFD, nous permet de jeter un regard sur le futur et d'analyser les différentes possibilités offertes aux fabricants de papier journal.

Voyons maintenant, en deuxième lieu, les variables de procédé que nous avons inclus dans notre recherche.

2.2.2 Choix des variables de procédé

Il y a deux genres de variables de procédé qui peuvent être considérés dans notre situation. D'une part, on a les variables qui influencent directement le procédé de fabrication des composants pris individuellement. D'autre part, on a les variables

qui s'appliquent aux mélanges comme tels. Reprenons les 4 pâtes choisies pour vérifier si nous pouvons modifier leurs conditions de mise en pâte.

En ce qui concerne la PMM, il est industriellement plus difficile de contrôler précisément et efficacement la qualité de cette pâte. En principe, les usines essaient de garder les conditions de mise en pâte à des niveaux constants. Comme il est pratiquement impossible de faire varier les conditions de mise en pâte de la PMM en laboratoire, celle-ci a été utilisée telle que produite industriellement.

Quant à la PTM, il aurait été possible de varier les conditions de mise en pâte en laboratoire puisque le C.R.P.P. dispose d'une usine pilote constituée principalement d'un raffineur dont les plaques sont de type plat et conique. Le but de ce travail étant de demeurer le plus près possible de l'application industrielle et comme les résultats de l'usine pilote dévient quelque peu de la réalité industrielle, nous avons donc décidé d'employer la PTM telle que produite en usine. Pour ces mêmes raisons, nous nous sommes procurés directement de la PFD produite par la compagnie Kruger à Bromptonville. Cette compagnie nous a également fourni la PMM et la PTM par le biais de son usine de Trois-Rivières.

Pour ce qui est de la PKSBR, nous n'avons pas essayé de modifier directement ses conditions de cuisson ou de blanchiment. Par contre, nous avons décidé de jouer avec ses propriétés mécaniques car on sait que la PKSBR est

généralement vendue avec une résistance au déchirement maximale et une résistance à la traction plutôt moyenne (voir tableau 2.4). Pour modifier les propriétés mécaniques de la PKSBR, il suffit de lui faire subir un traitement mécanique de raffinage en utilisant le raffineur de l'usine pilote du C.R.P.P. Malgré les quelques commentaires déjà émis concernant l'utilisation de l'usine pilote, le léger traitement mécanique que nous avons fait subir à la PKSBR n'est pas comparable à celui de la PTM. En effet, la PKSBR possède déjà ses caractéristiques industrielles. La différence entre ce traitement mécanique auquel la PKSBR a été soumise en laboratoire versus le même traitement mécanique réalisé à l'échelle industrielle est ainsi moins grande que dans le cas de la PTM.

Caractéristique	PMM	PTM	PFD	PKSBR
Indice d'égouttage CSF (ml)	47	93	332	640
Grammage (g/m ²)	60.3	59.8	60.9	60.2
Volume spécifique (cm ³ /g)	2.66	2.74	1.81	1.85
Densité apparente (g/cm ³)	0.38	0.36	0.55	0.54
Indice d'éclatement (kPa * m ² /g)	1.82	2.25	2.77	3.91
Indice de déchirure (mN * m ² /g)	5.16	8.99	9.92	17.00
Résistance du papier à l'état sec				
Longueur de rupture (km)	3.12	4.13	4.56	5.29
Allongement à la rupture (%)	1.28	1.92	2.68	2.81
Énergie absorbée à la rupture TEA (g/cm)	14	30	53	61
Résistance du papier à l'état humide (30%)				
Longueur de rupture (m)	262	318	145	198
Allongement à la rupture (%)	5.0	4.2	8.2	6.1
Énergie absorbée à la rupture TEA (g/cm)	3.7	4.2	3.6	3.3
Blancheur moyenne ISO (%)	54.8	57.7	74.6	73.3
Opacité moyenne ISO (%)	98.8	96.1	83.4	78.8
Coefficient de diffusion (m ² /kg)	69.4	60.1	37.5	35.2
Coefficient d'absorption (m ² /kg)	7.1	3.9	1.0	0.5
Fractions Bauer-McNett (%)				
R14	2.8	6.9	5.4	51.9
R28	14.4	25.6	20.5	26.8
R48	17.9	17.2	31.0	12.4
R100	15.8	14.4	24.3	5.9
R200	11.0	6.9	7.4	1.8
P200	38.2	29.2	11.5	1.2
Longueur moyenne des fibres (mm)	0.82	1.11	1.17	2.32

Tableau 2.4 : Caractéristiques des pâtes vierges utilisées

Il ne reste plus maintenant qu'à traiter le cas des variables de procédé qui affectent le mélange comme tel.

Dans le premier chapitre, il a été question de la relation non-linéaire qui existe entre l'opacité et le grammage. Comme l'opacité est une propriété très importante pour déterminer la qualité du papier, nous avons décidé de considérer le grammage des formettes de pâtes comme variable de procédé pour notre plan expérimental. Nous pourrions du même coup vérifier s'il existe bien une relation linéaire entre les propriétés mécaniques et le grammage comme mentionnée dans la littérature. Pour effectuer cette vérification, nous avons donc dû fabriquer des formettes de pâtes en utilisant un grammage différent de la méthode normalisée qui est de 60 g/m².

Notre choix des variables de procédés s'arrête ainsi au raffinage de la PKSBR et au grammage des formettes. Il ne nous reste plus qu'à élaborer un plan expérimental qui permettra d'orchestrer le mieux possible les 4 composants du mélange (*PFD*, *PMM*, *PTM* et *PKSBR*) et les 2 variables de procédé (*grammage des formettes* et *raffinage de la PKSBR*).

2.3 Élaboration du plan expérimental

Avant de poursuivre, il est important de rappeler le deuxième objectif énoncé au début de ce chapitre qui est de déterminer l'arrangement ou le niveau de chacune

des 6 variables qui produira les meilleures propriétés papetières possibles. En d'autres termes, on veut optimiser le système.

Une façon de se donner le plus de chance possible de rencontrer cet objectif est d'utiliser une méthode qui est énoncée par (25) et qu'on appelle méthode de réponses de surface. Celle-ci est en fait un ensemble de techniques entourant :

1. le développement de séries d'expériences (design expérimental) qui vont conduire à une évaluation adéquate et fiable des réponses désirées;
2. la détermination de modèles mathématiques s'ajustant le mieux possible aux données recueillies à partir du design élaboré en 1 tout en appliquant aux paramètres des modèles les tests d'hypothèses appropriés;
3. la détermination des conditions optimales des facteurs expérimentaux qui produisent un jeu optimal des propriétés papetières.

Le point 1 est traité dans cette présente section tandis que les deux autres font respectivement l'objet des chapitres III et IV.

On peut aisément constater que la méthode présentée ne pourra donner de bons résultats que si le design expérimental choisi est efficace. Il faut donc prendre le temps nécessaire pour élaborer un design qui produira les résultats escomptés tout en minimisant le nombre d'expériences. En ce qui concerne ce projet, nous

avons déjà déterminé les 6 facteurs expérimentaux qui doivent se retrouver dans notre design. Nous avons aussi vu que ces facteurs se divisent en deux classes : les 4 composants du mélange d'un côté et les 2 variables de procédé, de l'autre. Il est possible, et préférable dans notre cas, de construire 2 designs expérimentaux distincts et, ensuite, de les combiner pour obtenir un plan expérimental global.

2.3.1 Design expérimental des 4 composants du mélange

La difficulté principale rencontrée lors de l'élaboration d'un design expérimental de mélange est le fait que les niveaux (fractions) des facteurs expérimentaux (composants) ne sont pas indépendants. En effet, il faut que la somme des fractions de ces composants soit égale à 1. Pour rendre la tâche plus facile, il existe des designs préétablis qui tiennent compte des restrictions rattachées aux mélanges. Celui que nous avons choisi a été introduit en 1963 par Scheffé et s'appelle le *Simplex-Centroid Design* (SCD). La figure 2.1 illustre le domaine expérimental associé à un mélange à 4 composants. Ce domaine est représenté par une pyramide à base triangulaire ou, si on préfère, un tétraèdre. Le SCD est caractérisé, d'une part, par ces points expérimentaux qui sont tous des centroïdes de parties du tétraèdre comme le centroïde des arêtes. Même les points situés aux extrémités du tétraèdre peuvent être considérés comme étant le centroïde du point de rencontre de 3 arêtes.

L'autre particularité des points du SCD est que chaque point représente un mélange en proportions égales de 1, 2, 3 ou 4 pâtes. Prenons par exemple le centroïde des faces du tétraèdre (voir fig. 2.2) qui représente en fait un mélange de 3 pâtes dont les proportions sont de $33\frac{1}{3}\%$. Le nombre de points expérimentaux compris dans le tétraèdre se répartit comme suit :

1. 4 points correspondant aux extrémités (pâtes individuelles);
2. 6 points correspondant à chaque centroïde des arêtes (2 pâtes à la fois);
3. 4 points correspondant à chaque centroïde des faces (3 pâtes à la fois);
4. 1 point correspondant au centroïde global (4 pâtes à la fois).

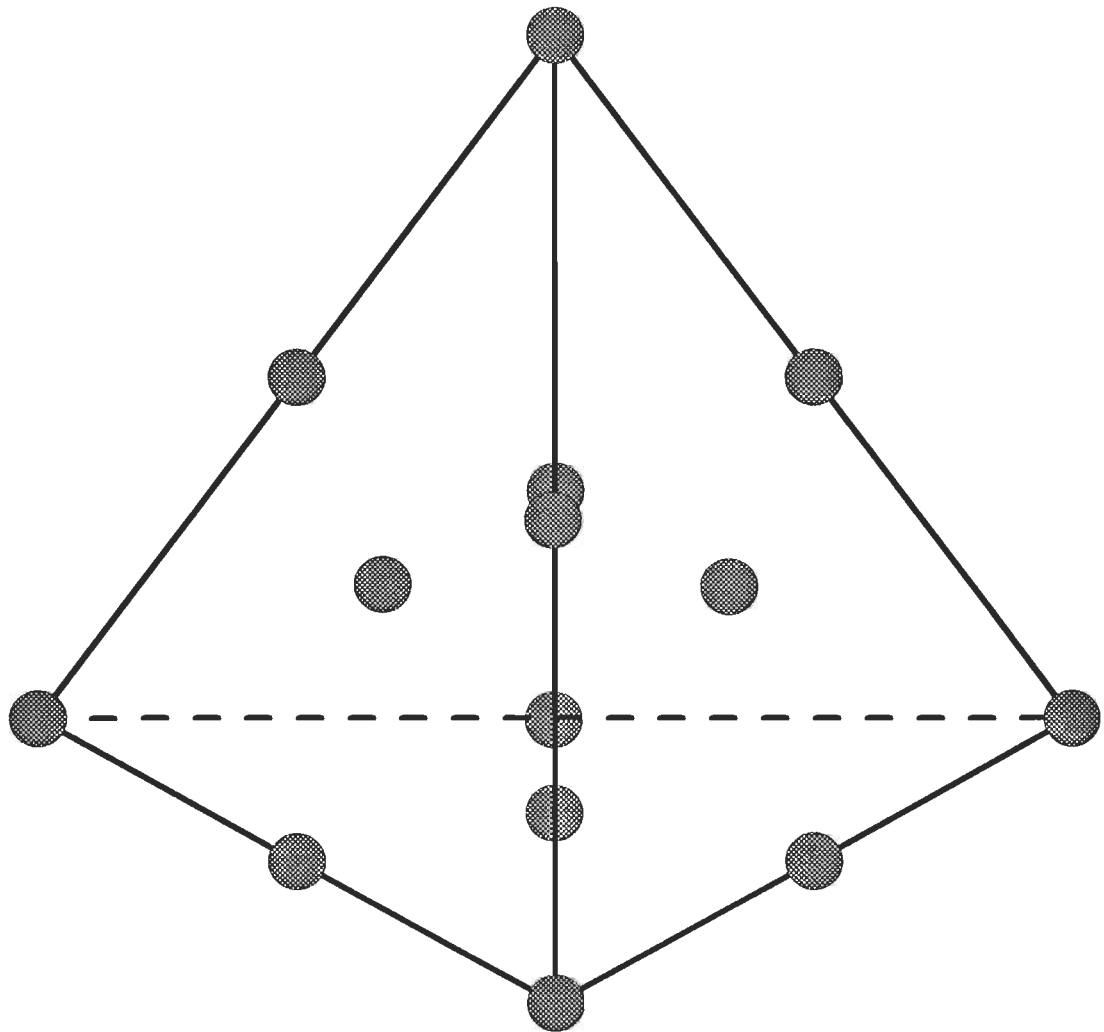


Fig. 2.1 : Design expérimental Simplex-Centroid (SCD)

Ce qui donne un total de 15 points expérimentaux auxquels il faut ajouter une répétition du point central (centroïde du tétraèdre) de façon à pouvoir calculer l'erreur expérimentale. Nous allons voir plus loin qu'il n'est pas nécessaire de répéter plus d'une fois le point central comme c'est normalement l'habitude. Le tableau 2.5 présente les 16 points expérimentaux du design de mélanges. Pour chaque point, on a la proportion respective pour chaque pâte.

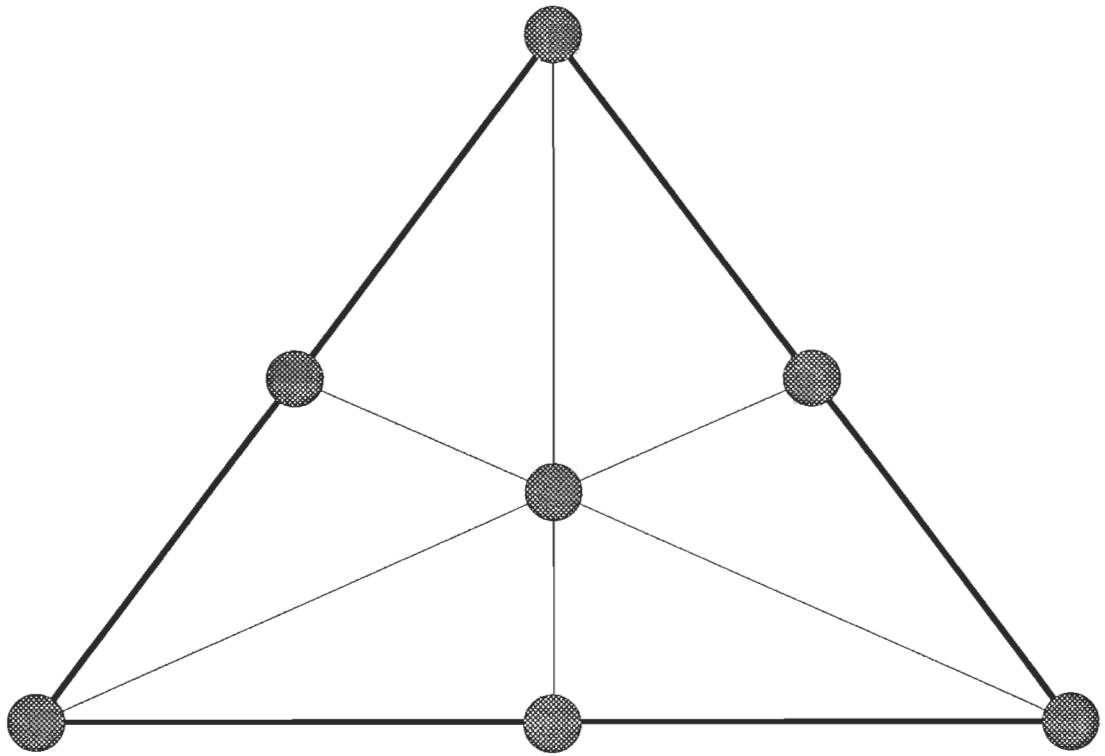


Fig. 2.2 : Face type du SCD

N°	PFD (%)	PMM (%)	PTM (%)	PKSBR (%)
1	100	0	0	0
2	0	100	0	0
3	0	0	100	0
4	0	0	0	100
5	50	50	0	0
6	50	0	50	0
7	50	0	0	50
8	0	50	50	0
9	0	50	0	50
10	0	0	50	50
11	33 1/3	33 1/3	33 1/3	0
12	33 1/3	33 1/3	0	33 1/3
13	33 1/3	0	33 1/3	33 1/3
14	0	33 1/3	33 1/3	33 1/3
15	25	25	25	25
16	25	25	25	25

Tableau 2.5 : Les 16 points expérimentaux du SCD

Il est à remarquer que ce design n'impose pas de plages de proportions à respecter pour aucune pâte. Ceci est nécessaire si on veut comparer différents scénarios lors de l'étape de l'optimisation.

2.3.2 Design expérimental des deux variables de procédé

Il est normalement plus facile de construire un design expérimental pour des variables de procédé que dans le cas de la section précédente. Il est cependant essentiel de savoir exactement ce que l'on cherche. Par exemple, si on pense qu'il existe des relations non-linéaires entre les facteurs et les réponses, il faut choisir le design en conséquence.

Les 2 variables de procédé qui ont été sélectionnées sont le grammage des formettes de pâte et le niveau de raffinage de la PKSBR. En ce qui concerne le grammage, il a été constaté au premier chapitre qu'il a toujours subi une tendance à la baisse au fil des années. On a aussi relevé que l'opacité, qui est une propriété essentielle dans la détermination de la qualité du papier, semble être liée au grammage par une relation non-linéaire. Il faut en tenir compte dans notre choix du design.

Pour ce qui est de la variable de raffinage, nous n'avons pas relevé d'indication précise concernant les relations qui peuvent exister entre les propriétés mécaniques de la PKSBR et celles du mélange final. Il se pourrait bien qu'il n'existe que des relations linéaires mais comme nous n'en sommes pas sûrs et que de toute façon nous avons déjà considéré la relation non-linéaire entre le grammage et l'opacité, nous avons supposé qu'il existe des relations non-linéaires entre le

raffinage de la PKSBR et les propriétés mécaniques du mélange final. De plus, cette prise de position a aussi l'avantage d'uniformiser le design expérimental.

Le design que nous avons choisi pour organiser les 2 variables de procédé est un design simple et efficace dont l'utilisation est très répandue. Ce design est le plan composite centré ou mieux connu sous le terme anglais *Central Composite Design* (CCD). La figure 2.3 montre la représentation en 2 dimensions de ce design.

Ce design est composé de 3 parties distinctes. Tout d'abord, il y a les 4 points dont les coordonnées sont $(1, 1)$, $(1, -1)$, $(-1, 1)$ et $(-1, -1)$ qui sont les points d'un plan factoriel 2^3 . Ensuite, il y a les 4 points situés aux extrémités d'une étoile et dont les coordonnées sont $(1.41, 0)$, $(0, -1.41)$, $(-1.41, 0)$ et $(0, 1.41)$. Il est à remarquer que la distance entre 2 extrémités de l'étoile est égale à la longueur des diagonales du carré formé par le plan factoriel 2^3 . Enfin, la troisième partie correspond au point central $(0, 0)$. Habituellement, le point central est répété plusieurs fois de façon à pouvoir calculer l'erreur expérimentale associée aux manipulations effectuées en laboratoire. À cet égard, nous discuterons plus loin du fait que nous n'avons pas répété le point central du CCD.

Maintenant que les 2 designs de base sont définis, il ne reste plus qu'à les jumeler pour obtenir le plan expérimental global.

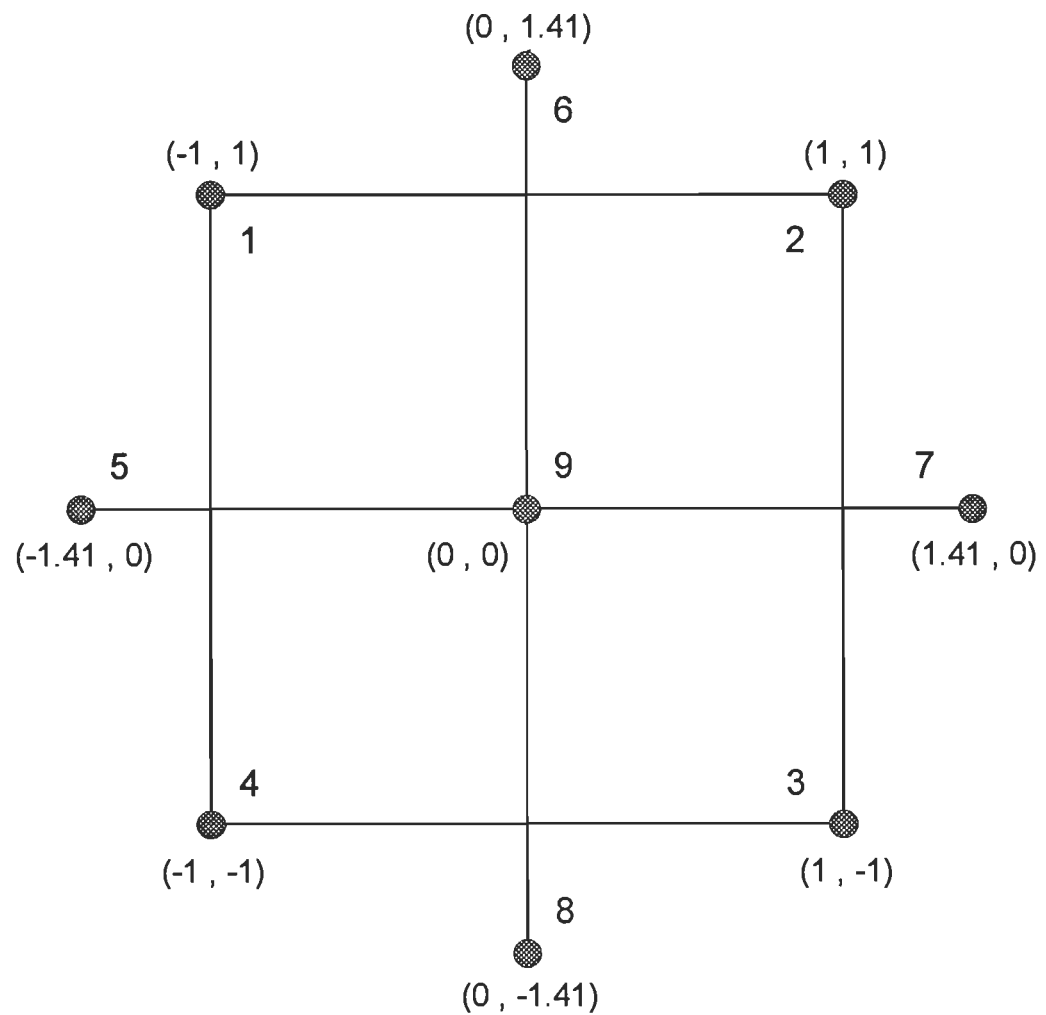


Fig. 2.3 : Plan composite centré (CCD)

2.3.3 Jumelage des designs SCD et CCD

Le jumelage des designs est, à toute fin pratique, assez simple à effectuer. En effet, il suffit de placer un design de mélange (tétraèdre) sur chacun des 9 points du design des variables de procédé (CCD). La figure 2.4 illustre schématiquement

le résultat final. Le design expérimental global comprend donc 144 points expérimentaux pour lesquels on a 9 réponses (propriétés papetières) à évaluer.

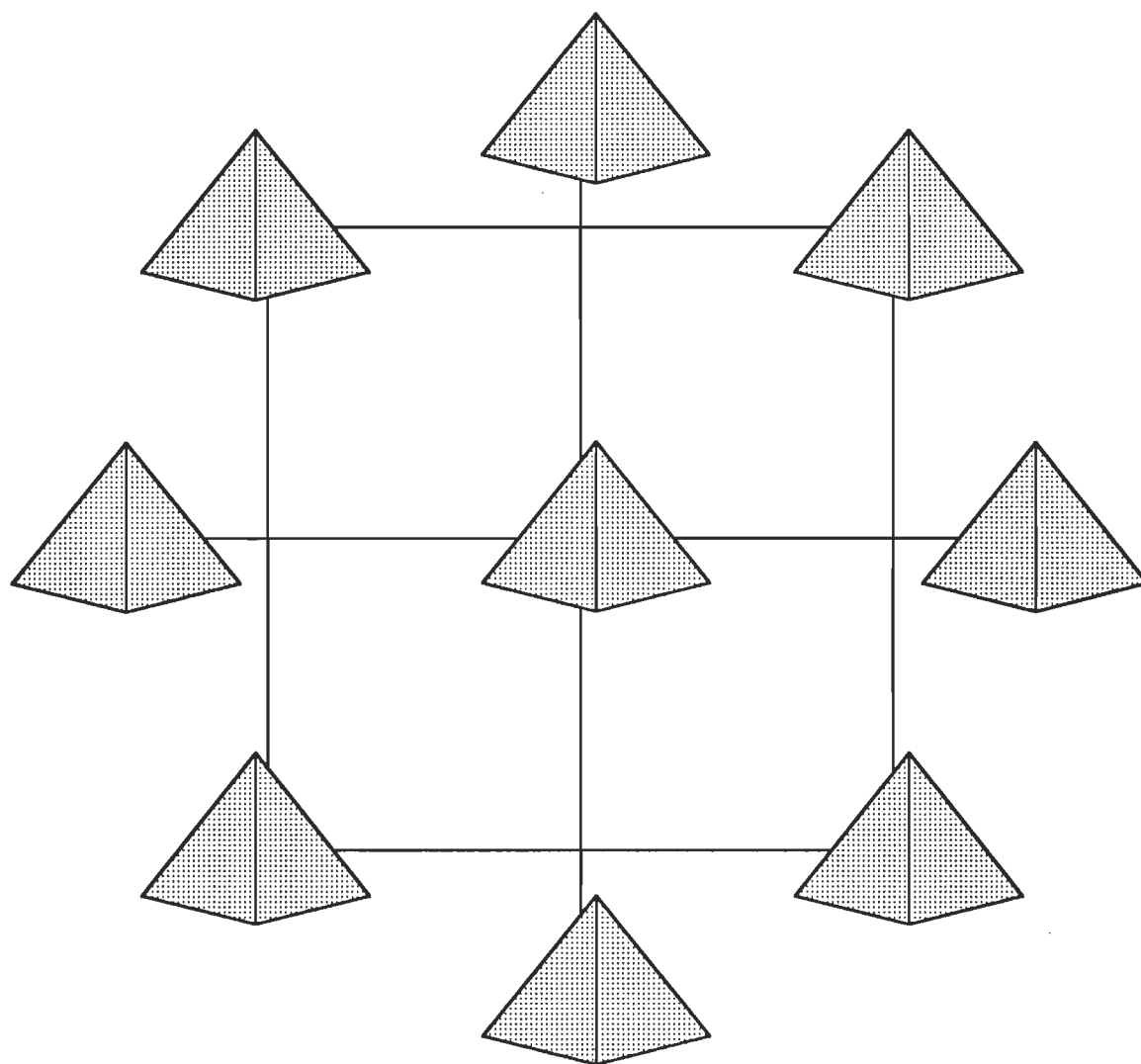


Fig. 2.4 : Jumelage des designs SCD et CCD

Il est à remarquer qu'à chacun des 9 tétraèdres correspond un jeu spécifique des niveaux de la variable grammage et de la variable raffinage. Prenons, par

exemple, le cas du point du CCD : $(1.41, 0)$. Le tableau 2.6 montre la manière dont les points d'un tétraèdre sont associés à chaque point du CCD.

N°	Grammage	Raffinage	PFD (%)	PMM (%)	PTM (%)	PKSBR (%)
1	1.41	0	100	0	0	0
2	1.41	0	0	100	0	0
3	1.41	0	0	0	100	0
4	1.41	0	0	0	0	100
5	1.41	0	50	50	0	0
6	1.41	0	50	0	50	0
7	1.41	0	50	0	0	50
8	1.41	0	0	50	50	0
9	1.41	0	0	50	0	50
10	1.41	0	0	0	50	50
11	1.41	0	33 1/3	33 1/3	33 1/3	0
12	1.41	0	33 1/3	33 1/3	0	33 1/3
13	1.41	0	33 1/3	0	33 1/3	33 1/3
14	1.41	0	0	33 1/3	33 1/3	33 1/3
15	1.41	0	25	25	25	25
16	1.41	0	25	25	25	25

Tableau 2.6 : Exemple pour le point $(1.41, 0)$ du CCD

En premier lieu, on remarque en regardant le tableau 2.6 que les points 15 et 16 du tétraèdre sont identiques. Comme il est souligné à la section 2.4, cette répétition pour chaque tétraèdre correspond à 1 semaine de travail et permet de qualifier la précision des manipulations effectuées semaine après semaine. Le

design global étant constitué de 9 tétraèdres, on a donc 18 points expérimentaux qui participent au calcul de l'erreur expérimentale.

En deuxième lieu, il faut se pencher sur le cas de la variable *Raffinage*. On sait que cette variable s'applique directement au composant *PKSBR*. Les autres composants, pris individuellement, ne sont pas affectés par cette variable. Par ailleurs, si on retourne à la figure 2.4, on constate que des tétraèdres sont situés sur une même ligne ou même niveau. En effet, supposons que la variable *Grammage* soit placée sur l'axe horizontal et la variable *Raffinage*, sur l'axe vertical. Par conséquent, pour les points du CCD dont les premières coordonnées sont 1, 0 et -1, il y aura respectivement 2, 3 et 2 tétraèdres situés sur une même ligne verticale. Maintenant, si on combine la relation directe entre la variable *Raffinage* et le composant *PKSBR*, et le fait que seulement 9 mélanges (n° 4, 7, 9, 10, 12-16) contiennent de la PKSBR, on s'aperçoit que, à grammage constant, 7 mélanges se répètent d'un tétraèdre à l'autre. Cette constatation est importante puisque ces répétitions pourront aussi participer au calcul de l'erreur expérimentale.

En résumé, l'erreur expérimentale sera calculée à partir d'une répétition associée à chaque tétraèdre. Cette répétition hebdomadaire comme nous le verrons à la prochaine section permettra ainsi de mesurer le degré de précision se rapportant à chaque SCD. Ensuite, on a que l'erreur comprendra une partie associée aux répétitions effectuées d'un SCD à l'autre ou d'une semaine à l'autre. Par

conséquent, cette partie tient compte entre autres de l'évolution des pâtes avec le temps. En effet, le plan expérimental global a été réalisé en 10 semaines et il faut également ajouter 2 semaines de préparation et d'acquisition des pâtes. Le tableau 2.7 fait le point sur le nombre total de points du design global qui participeront au calcul de l'erreur expérimentale.

Niveau de la variable <i>Grammage</i>	Nombre de SCD par niveau	Nombre de points par SCD	Nombre de points par SCD	Nombre de SCD	Total
1	2	-	7	-	14
0	3	-	7	-	21
-1	2	-	7	-	14
-	-	2	-	9	18
Total			30		67

Tableau 2.7 : Points participant au calcul de l'erreur expérimentale

Cette section sur l'élaboration du plan expérimental étant complétée, il ne reste plus qu'à présenter les étapes de la procédure expérimentale qui ont été suivies tout au long de la partie laboratoire de ce travail.

2.4 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale, qui est expliquée ici et présentée schématiquement à la figure 2.5, est celle qui a été utilisée pour chacun des points

de design du CCD décrit précédemment. Cette procédure représente 5 jours de travail au laboratoire. Nous avons donc décidé de réaliser un point du CCD par semaine pour un total de 9 semaines de laboratoire.

Pour chaque semaine de laboratoire, la première journée comprend les six premières étapes de la procédure et les deux autres étapes constituent au total quatre jours de laboratoire. Toutes les étapes peuvent être aisément réalisées par une seule personne à l'exception de la partie concernant la préparation et les essais de traction sur les formettes humides qui s'effectue plus facilement et plus rapidement par deux personnes.

2.4.1 Désintégration des pâtes vierges

Cette étape consiste à remettre en phase aqueuse les pâtes vierges qui sont conservées individuellement dans un réfrigérateur dans des sacs étanches en plastique noir pour protéger les pâtes contre la lumière. La méthode de désintégration que nous avons utilisée est celle de l'enlèvement de la latence par la désintégration à l'eau bouillante (voir tableau 2.1). Cette méthode est aussi appelée méthode de Domtar.

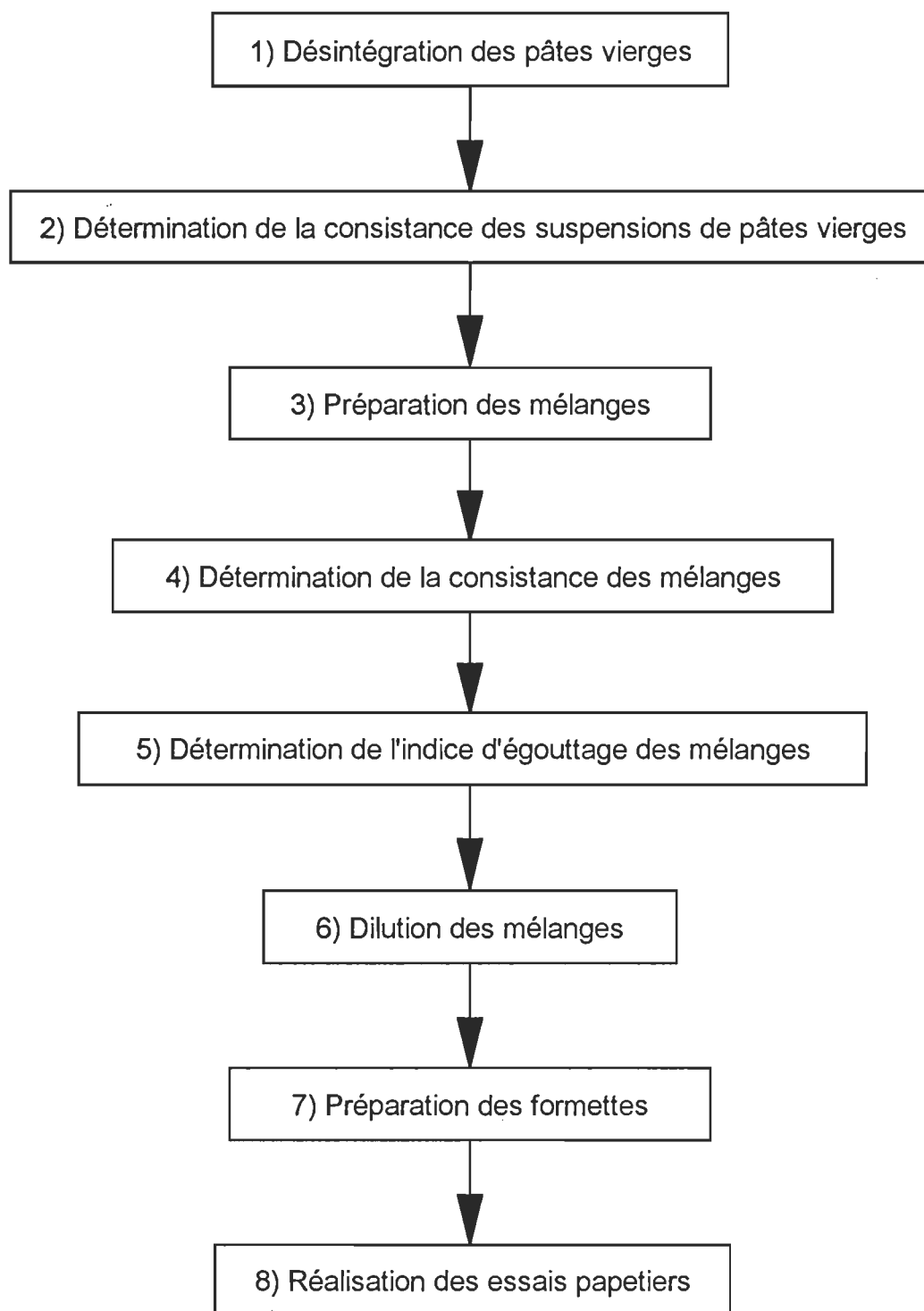


Fig. 2.5 : Étapes de la procédure expérimentale

Pour réaliser l'ensemble des essais papetiers choisis, de 120 à 130 g de pâte sèche (de chaque pâte vierge) sont nécessaires. Cette quantité de pâte à désintégrer est trop élevée pour le bac standard de 3 L de l'appareil Domtar, mais convient très bien à celui de 7 L. La même méthode standard s'applique pour les 2 bacs.

De manière à minimiser les erreurs de manipulation lors du mesurage des volumes de suspension de pâte destinées aux différents mélanges, nous avons dilué les suspensions de pâte jusqu'à des consistances variant de 0.4 à 0.5 %.

2.4.2 Détermination de la consistance des suspensions de pâtes vierges

Cette étape consiste à déterminer la proportion exacte de pâte sèche par volume de suspension exprimée en pourcentage ou en grammes de pâte sèche par 100 ml de suspension. La méthode standard utilisée est celle énoncée au tableau 2.1. Comme beaucoup de résultats dépendent de la précision à laquelle les mélanges seront effectués, nous avons mesuré deux fois la consistance de chaque suspension et nous avons pris la moyenne de ces deux valeurs. En outre, nous avons aussi comparé les deux valeurs obtenues pour chaque suspension pour vérifier si une différence importante existait entre elles. Dans l'affirmative, on remesurait la consistance de la suspension pour obtenir une moyenne basée sur trois valeurs. Cette précaution n'a cependant pas été utilisée très fréquemment puisque la méthode employée donne généralement des résultats assez précis.

Maintenant que les consistances de chacune des 4 suspensions de pâte sont connues, nous pouvons passer à l'étape suivante.

2.4.3 Préparation des mélanges

Il faut accorder une attention particulière à cette 3^e étape puisque tous les résultats dépendent de la précision des mélanges. Avant de passer à la préparation des mélanges proprement dite, il faut tout d'abord évaluer la quantité de pâte sèche requise pour réaliser l'ensemble des essais.

Essai	Grammage (g/m ²)				
	36	39.5	48	56.5	60
Consistance (g)	2	2	2	2	2
Indice d'égouttage (g)	3	3	3	3	3
Formettes (g)	9	9	12	14	14
Total	14	14	17	19	19

Tableau 2.8 : Quantité de pâte sèche requise par mélange

Les valeurs totales inscrites au tableau 2.8 sont des valeurs minimales. Comme il est presque impossible de reproduire deux fois un mélange identique, il vaut mieux prévoir une quantité suffisante de pâte sèche pour chaque mélange pour le cas où il faudrait recommencer certains essais. Les nouvelles valeurs utilisées pour effectuer les mélanges sont respectivement : 20, 20, 23, 25 et 25 g.

À l'aide de ces valeurs et de la consistance des pâtes vierges, on peut maintenant calculer le volume de pâte requis correspondant à la fraction définie par le design expérimental. Pour faciliter le calcul de tous les volumes nécessaires pour préparer les 16 mélanges hebdomadaires, et aussi pour limiter les risques d'erreurs, nous nous sommes servis du tableau 2.9 comme modèle.

On retrouve dans ce tableau, les deux coordonnées du CCD soient le grammage et le raffinage correspondant à un des neuf points expérimentaux sur lesquelles nous avons placé un tétraèdre. La valeur du grammage est utile lors de la préparation des formettes tandis que la coordonnée du raffinage indique le numéro de la PKSBR à utiliser pour la semaine en cours. Rappelons que ce numéro correspond à un niveau du taux de raffinage de la PKSBR de départ. Ensuite, nous retrouvons les consistances des suspensions de pâtes vierges ainsi que la masse de pâte sèche requise pour chaque mélange. Les valeurs en italique représentent les valeurs à calculer et à inscrire à chaque semaine.

Finalement, dans la dernière partie du tableau, nous avons, en tête de colonne, les 4 pâtes vierges à mélanger. Pour chaque pâte, il y a une colonne pour la proportion de chaque pâte dans les 16 mélanges. Comme nous l'avons précisé précédemment, l'ordre de préparation des mélanges varie aléatoirement à toutes les

semaines et, par conséquent, pour les 9 tétraèdres. L'autre colonne sert à inscrire les volumes de suspension calculés à partir de la relation suivante :

$$\text{volume (ml)} = \frac{\text{masse requise de pâte sèche (g)}}{\text{consistance (\%)}} \times \text{proportion} \times 100$$

Grammage :		56.5 g/m²		Raffinage :		PKSBR_1		
Consistance des suspensions de pâte :								
PMM :		0.504 %		PFD :		0.476 %		
PTM :		0.503 %		PKSBR :		0.470 %		
Masse requise de pâte sèche par mélange :				25 g				
N°	PMM		PTM		PFD		PKSBR	
	(%)	(ml)	(%)	(ml)	(%)	(ml)	(%)	(ml)
1	50	2480	50	2485	0	0	0	0
2	25	1240	25	1245	25	1315	25	1330
3	0	0	0	0	50	2630	50	2660
4	0	0	0	0	0	0	1	5320
5	0	0	33 1/3	1655	33 1/3	1755	33 1/3	1775
6	1	4955	0	0	0	0	0	0
7	33 1/3	1650	33 1/3	1655	33 1/3	1755	0	0
8	50	2480	0	0	50	2630	0	0
9	25	1240	25	1245	25	1315	25	1330
10	33 1/3	1650	33 1/3	1655	0	0	33 1/3	1775
11	0	0	1	4970	0	0	0	0
12	33 1/3	1650	0	0	33 1/3	1755	33 1/3	1775
13	0	0	50	2485	0	0	50	2660
14	0	0	50	2485	50	2630	0	0
15	50	2480	0	0	0	0	50	2660
16	0	0	0	0	1	5260	0	0

Tableau 2.9 : Modèle pour le calcul des volumes des pâtes

Il suffit maintenant de préparer les 16 mélanges en portant une attention particulière à la précision dans la mesure des volumes de suspension car les résultats dépendent de la qualité des mélanges. Nous recommandons de rincer les

cylindres gradués après chaque mesure de volume pour éviter la contamination et les erreurs de mesure.

2.4.4 Détermination de la consistance des mélanges

Le premier essai à effectuer sur les mélanges est la détermination de l'indice d'égouttage. Cet essai requiert 3 g de pâte sèche telle qu'exigée par la méthode standard. Il est donc nécessaire de mesurer la consistance des 16 mélanges. Contrairement à la procédure décrite à la section 2.4.2, nous n'avons mesuré qu'une seule fois la consistance par mélange. C'est une méthode assez précise pour la détermination de l'indice d'égouttage.

2.4.5 Détermination de l'indice d'égouttage des mélanges

Il n'y a pas de remarque particulière à faire à propos de cet essai si ce n'est qu'il suffit d'appliquer la méthode standard telle que décrite au tableau 2.1.

2.4.6 Dilution des mélanges

Cette étape est nécessaire pour la fabrication des formettes. En effet, la procédure standard indique que la consistance de la suspension de pâte destinée

à la préparation de formettes doit être d'environ 0.15 %. La consistance actuelle des mélanges se situe entre 0.4 et 0.5%.

Pour faciliter l'étape de la dilution, étape répétée à toutes les semaines, nous avons utilisé les mêmes chaudières sur lesquelles nous avons inscrit une marque correspondant à un volume mesuré de 13 L. En tenant compte de la masse de pâte sèche de départ (25 g dans l'exemple précédent) et des différentes masses requises pour effectuer les mesures de consistance et d'indice d'égouttage, la consistance de chaque mélange, après avoir ajouté de l'eau jusqu'au niveau marqué (13 L), s'est bien située aux environs de 0.15 %.

2.4.7 Préparation des formettes

La préparation des formettes a été réalisée en deux journées. La première a été réservée aux formettes destinées aux essais à l'état sec et l'autre, aux formettes destinées aux essais à l'état humide. Les deux méthodes utilisées sont présentées au tableau 2.1.

2.4.8 Réalisation des essais papetiers

Décrivons tout d'abord la manière à laquelle nous avons procédé pour effectuer les essais à l'état humide des formettes. Cet essai requiert une attention

particulière puisqu'il faut éviter de laisser sécher les formettes trop longtemps avant de faire l'essai de traction proprement dit. En raison du nombre important de mélanges sur lesquels il faut faire cet essai, il est donc nécessaire de procéder par groupe de mélanges. Dans notre cas, nous avons formé 4 groupes de 4 mélanges.

Maintenant en ce qui concerne les essais papetiers sur les formettes à l'état sec, il est nécessaire de définir une démarche logique puisque certains essais sont des essais destructifs. Voici un aperçu de la démarche que nous avons suivie pour effectuer les essais papetiers.

2.4.8.1 Essais non-destructifs

Les essais non-destructifs comprennent le grammage, l'épaisseur et les propriétés optiques telles que le degré de blancheur, l'opacité et les pouvoirs de diffusion et d'absorption lumineuse. Il n'est pas nécessaire d'effectuer ces essais dans un ordre particulier mais il est préférable de conserver une certaine routine de façon à éviter de passer une étape.

2.4.8.2 Essais physiques

Les essais physiques ou destructifs sont les résistances à l'éclatement, au déchirement et à la traction. Tous les essais (destructifs ou non) sont effectués à partir de méthodes standards telles qu'énoncées au tableau 2.1.

Ce chapitre sur l'élaboration de la procédure expérimentale est maintenant complété. Le chapitre suivant correspond, comme nous l'avons mentionné précédemment, à la deuxième étape de la méthode des réponses de surface qui est la modélisation.

CHAPITRE III

3. MODÉLISATION

Nous avons vu au chapitre précédent (section 2.3) que la méthode des réponses de surface comprend trois étapes. La première ayant déjà été décrite en détail, nous allons maintenant examiner la deuxième qui est la modélisation.

Lorsque la méthode des réponses de surface a été présentée, nous avons mentionné qu'il fallait accorder le temps nécessaire à l'élaboration d'un design expérimental qui puisse répondre aux questions qui nous préoccupent. Il ne faut cependant pas négliger la modélisation. Et, ce qu'on entend par modélisation, c'est la détermination de relations empiriques reliant les facteurs expérimentaux aux mesures effectuées en laboratoire. Ces relations empiriques peuvent être déterminées par analyse de régression. L'analyse de régression est un des outils les plus employés pour la recherche de relations de cause à effet. Elle s'applique à plusieurs domaines comme les sciences physiques, biologiques et sociales, l'ingénierie et à de nombreux autres.

3.1 Modèle polynomial de régression

La relation recherchée entre des facteurs expérimentaux et une réponse évaluée en laboratoire peut se présenter sous différentes formes. Le modèle le plus simple et le plus populaire est certainement le modèle polynomial. Un modèle quadratique général est représenté par

$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^q \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{q-1} \sum_{j>i} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^q \beta_{ii} X_i^2$$

où \hat{Y} est la réponse estimée par le polynôme; β_0 est une constante; q est le nombre de variables indépendantes principales, X_i , β_i , β_{ij} et β_{ii} sont les coefficients de régression. Ce polynôme est composé de trois sommations. La première constitue la partie linéaire, la deuxième, les termes croisés ou interactions, et la troisième, les termes quadratiques.

Généralement, il n'est ni nécessaire ni souhaitable d'introduire des termes d'ordre supérieur comme des termes cubiques car il devient plus difficile de comprendre la signification des termes supérieurs. Il existe des tests d'hypothèses qui permettent de déterminer si le modèle obtenu est significatif selon le niveau de confiance désiré. Ces tests sont présentés plus loin.

Avant de s'attaquer au problème principal soit l'estimation des coefficients de régression, il est bon de revoir certaines notions statistiques.

3.2 Rappel de notions statistiques

Dans cette section, nous allons réviser quelques notions statistiques connexes à l'analyse de la variance. Nous allons donc voir la table d'analyse de variance (ANOVA), les coefficients de détermination R^2 et R_A^2 , le test d'hypothèse F et le test du manque d'ajustement (*lack of fit*).

3.2.1 La table d'analyse de variance

La table d'analyse de variance (ANOVA) sert à la compilation des résultats de l'analyse de régression. Les éléments de la table représentent les informations concernant les sources séparées de variation dans les données. La variation totale du jeu de données est appelée la somme totale des carrés (*STC*). En posant, N , le nombre total d'observations, la valeur *STC* est calculée en additionnant les carrés des différences entre les valeurs observées, Y_u , et leur valeur moyenne, \bar{Y} .

$$STC = \sum_{u=1}^N (Y_u - \bar{Y})^2$$

$$\text{avec : } \bar{Y} = \frac{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_N}{N}$$

Le nombre de degrés de liberté (*DL*) associé à *STC* est $N - 1$ dans le cas où il y aurait une constante (β_0) dans le modèle et N , lorsqu'il n'y en a pas. La constante β_0 représente la valeur que prend \hat{Y} lorsque tous les autres termes du modèle sont

nuls. Il est possible d'obtenir une constante β_0 égale à zéro. Cette possibilité concerne particulièrement notre travail car il est essentiel que les relations empiriques obtenues par régression linéaire donnent une réponse nulle lorsque les proportions de tous les composants sont zéro. En effet, on ne peut pas mesurer une propriété papetière en l'absence de matière. Afin d'alléger le texte, nous avons donc négligé le cas général, $N - 1$, pour plutôt considérer que le DL associé à STC est égal au nombre d'observations, N .

La STC se répartit en deux sommes : la somme des carrés due à la régression (SCR) et la somme des carrés non expliquée par le modèle ajusté (SCE). La SCR se définit aussi comme étant la somme des carrés expliquée par le modèle ajusté. On calcule la SCR à l'aide de cette formule :

$$SCR = \sum_{u=1}^N (\hat{Y}_u - \bar{Y})^2$$

La déviation $\hat{Y}_u - \bar{Y}$ est la différence entre la valeur prédite, \hat{Y}_u , par le modèle ajusté pour la u^e observation et la moyenne globale des Y_u , \bar{Y} . Le DL est directement égal au nombre de paramètres, p , contenus dans le modèle ajusté. La SCE , appelée aussi la somme des carrés de l'erreur totale, se calcule à l'aide de la formule suivante.

$$SCE = \sum_{u=1}^N (Y_u - \hat{Y}_u)^2$$

La déviation $Y_u - \hat{Y}_u$ est la différence entre la valeur observée, Y_u , et la valeur prédite, \hat{Y}_u , par le modèle ajusté pour la u^e observation. Le DL pour SCE est égal à $N - p$.

Le tableau 3.1 montre la manière dont la table d'ANOVA est normalement présentée. On y retrouve la colonne des sources de variation, la colonne des DL associés aux différentes sources de variation, la colonne des sommes de carrés (SCR , SCE et STC) et, finalement, la colonne des moyennes des carrés (MC).

Source de variation	Degrés de libertés (DL)	Somme des carrés (SC)	Moyenne des carrés (MC)
Régression	p	SCR	$MCR = \frac{SCR}{p}$
Erreur totale	N-p	SCE	$MCE = \frac{SCE}{(N - p)}$
Totale	N	STC	

Tableau 3.1 : Table de l'analyse de variance (ANOVA)

3.2.2 Coefficients de détermination R^2 et R_A^2

Le coefficient de détermination R^2 est une mesure de la proportion de la variation totale expliquée par le modèle ajusté. C'est donc le rapport entre la SCR et la STC . C'est aussi le carré de la corrélation entre la variable dépendante et les valeurs prédites par le modèle. On l'exprime habituellement en terme de

pourcentage en multipliant par 100. Mentionnons aussi la statistique connexe qui est le R^2 ajusté (R_A^2).

$$R^2 = \frac{SCR}{STC}$$

$$R_A^2 = 1 - \left(\frac{\frac{SCE}{N-p}}{\frac{STC}{N}} \right) = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{N}{N-p} \right)$$

La différence entre R^2 et R_A^2 est que celui-ci tient compte du rapport entre le DL de l'erreur totale et le DL du modèle ajusté. Plusieurs personnes préfèrent utiliser le premier tandis que d'autres optent plutôt pour le deuxième.

Il existe d'autres moyens pour évaluer la rigueur d'un modèle ajusté. Nous allons tout d'abord voir le principal test d'hypothèse F . Ce test s'intègre très bien à la table d'ANOVA.

3.2.3 Test d'hypothèse F

Le test de signification F permet de comparer une source de variation (autre que la variation totale, STC) à une autre comme l'erreur totale (SCE). Le test F vérifie l'hypothèse nulle, H_0 : toutes les valeurs des β_i sont égales à zéro. L'hypothèse alternative est H_a : au moins une valeur des β_i n'est pas égale à zéro. En supposant la normalité des erreurs, le test de H_0 implique comme première étape de calculer la valeur de la statistique F .

$$F = \frac{MCR}{MCE} = \left(\frac{\frac{SCR}{p}}{\frac{SCE}{N - p}} \right) = \left(\frac{SCR}{SCE} \right) \times \left(\frac{N - p}{p} \right)$$

où MCR est la moyenne des carrés de la régression et MCE est la moyenne des carrés de l'erreur. Si l'hypothèse nulle est vraie, F suit une distribution F avec p et $N - p$ degrés de liberté au numérateur et au dénominateur, respectivement. La deuxième étape du test de H_0 est de comparer la valeur de F avec une valeur tabulée, $F_{\alpha, p, N - p}$. Si la valeur de F excède celle de $F_{\alpha, p, N - p}$, alors l'hypothèse nulle est rejetée à un niveau de confiance α et on en déduit que la variation expliquée par le modèle est significativement plus élevée que la variation non expliquée.

Pour terminer cette section sur le test F , il faut ajouter que l'on peut étendre l'application de ce test aux paramètres individuels du modèle ajusté et vérifier ainsi si la variation expliquée par chacun des paramètres est significativement supérieure à la variation non expliquée, SCE . Pour ce faire, il suffit d'exprimer chaque paramètre du modèle comme étant une source de variation indépendante. La statistique F est ensuite appliquée à chaque paramètre. Pour compléter le test, il ne reste plus qu'à comparer les F calculés à une valeur tabulée unique pour tous les paramètres soit $F_{\alpha, 1, N - p}$. En effet, p est 1 dans ce cas puisqu'on compare un paramètre à la fois avec la SCE . Nous allons voir plus loin que le programme informatique utilisé, comme la plupart des programmes statistiques, effectue tout ce travail automatiquement.

3.2.4 Test du manque d'ajustement

La deuxième méthode employée pour mesurer la rigueur des modèles ajustés concerne un commentaire formulé à la section 3.1. Il est question à cette section de l'utilisation de modèles quadratiques versus des modèles d'ordres supérieurs pour effectuer la modélisation. Nous précisons alors qu'il n'est pas souhaitable de choisir des modèles de régression d'ordre supérieur à 2 parce qu'il devient plus difficile de comprendre le ou les phénomènes physiques expliqués par les relations empiriques. De plus, la complexité des modèles de régression augmente rapidement à mesure que le nombre de facteurs expérimentaux s'accroît.

Compte tenu de ce qui précède, la modélisation s'effectue, dans un premier temps, en ajustant un modèle linéaire aux données expérimentales. On évalue alors le manque d'ajustement de ce modèle par rapport aux données à l'aide d'une technique qui implique l'erreur expérimentale (ou l'erreur pure). Si le manque d'ajustement est trop important, on passe, dans un deuxième temps, au modèle quadratique. Cette technique s'intègre aussi très bien à la table d'ANOVA. Le manque d'ajustement (de l'anglais *Lack of fit*) d'un modèle peut être causé par l'une ou l'autre (ou les deux) des raisons suivantes :

1. soit que des paramètres (autres que ceux déjà inclus dans le modèle proposé) qui influencent la réponse aient été omis;

2. soit que l'omission de termes d'ordres supérieurs impliquant les paramètres du modèle proposé sont nécessaires pour expliquer adéquatement le comportement de la réponse.

En principe, il est plutôt difficile d'introduire dans une étude dont les manipulations en laboratoire sont terminées, de nouveaux facteurs expérimentaux parce qu'il faudrait effectuer de nouvelles manipulations. C'est pourquoi, on considère généralement la 2^e hypothèse comme cause du manque d'ajustement détecté. De toute façon, le temps nécessaire pour vérifier cette hypothèse est négligeable, avec les ordinateurs d'aujourd'hui, comparativement au temps nécessaire pour réaliser de nouveaux essais. Si le manque d'ajustement reste toujours important après avoir introduit des termes d'ordres supérieurs dans le modèle, il serait peut-être préférable de revoir le design expérimental dans son ensemble.

Le test du manque d'ajustement s'effectue en partageant la somme des carrés des résiduels (SCE) en deux sources de variation. La première source correspond à la variation parmi les points expérimentaux répétés. La somme des carrés associée à cette première source de variation s'appelle la somme des carrés pour l'erreur pure (SC_{EP}).

$$SC_{EP} = \sum_{k=1}^n \sum_{u=1}^{r_k} (Y_{uk} - \bar{Y}_k)^2$$

où Y_{uk} représente la u^{e} observation au k^{e} point de design avec $u = 1, 2, \dots, r_k \geq 1$ et $k = 1, 2, \dots, n$. \bar{Y}_k est définie comme étant la moyenne des r_k observations au k^{e} point de design et n est le nombre de points distincts du design, c.-à-d., le nombre de points expérimentaux différents. Par exemple, au chapitre II on a vu que chaque tétraèdre ou SCD possède une répétition pour un total de 2 points (points n° 15 et 16 du tableau 2.5). Ces 2 points comptent donc pour 1 seul point distinct. Ainsi, la valeur de n pour notre plan expérimental est égale à 107. Pour arriver à 107, il faut prendre le nombre total de points expérimentaux qui est de 144 (9 SCD multipliés par 16 points par SCD) moins le DL utilisé pour le calcul de SC_{EP} soit 37. Celui-ci provient de la soustraction du nombre total des points participant au calcul de l'erreur expérimentale, 67 (voir tableau 3.2) et du nombre de points différents, 30.

$$144 - (67 - 30) = 107$$

Niveau de la variable <i>Grammage</i>	Nombre de SCD par niveau	Nombre de points par SCD	Nombre de points par SCD	Nombre de SCD	Total
1	2	-	7	-	14
0	3	-	7	-	21
-1	2	-	7	-	14
-	-	2	-	9	18
Total			30		67

Tableau 3.2 : Points participant au calcul de l'erreur expérimentale

Par ailleurs, la somme des carrés pour le manque d'ajustement (SC_{MA}) est calculée en soustrayant la SC_{PE} de la SCE .

$$SC_{MA} = SCE - SC_{EP}$$

Le DL associé avec SC_{EP} est $N - n$, ce qui entraîne que le DL associé avec SC_{MA} est $(N - p) - (N - n) = n - p$. Le tableau 3.3 illustre les modifications apportées à la table d'ANOVA pour inclure SC_{EP} et SC_{MA} . La table d'ANOVA comporte, en plus, une nouvelle colonne pour introduire le test F tel qu'expliqué précédemment.

Source de variation	DL	SC	MC	F
Régression	p	SCR	$MCR = \frac{SCR}{p}$	$F_R = \frac{MCR}{MCE}$
Erreur totale	N-p	SCE	$MCE = \frac{SCE}{N-p}$	
Manque d'ajustement	n-p	SC_{MA}	$MC_{MA} = \frac{SC_{MA}}{n-p}$	$F_{MA} = \frac{MC_{MA}}{MC_{EP}}$
Erreur pure	N-n	SC_{EP}	$MC_{EP} = \frac{SC_{EP}}{N-n}$	
Totale	N	STC		

Tableau 3.3 : Table d'ANOVA modifiée pour le manque d'ajustement

Nous avons vu jusqu'à présent les quelques notions de statistiques nécessaires pour utiliser les informations fournies par le programme informatique qui sera décrit à la section 3.4. Voyons maintenant le modèle de régression qui servira de modèle de base pour réaliser les régressions linéaires.

3.3 Modèle de régression proposé

Depuis le début de ce chapitre, nous avons parlé à plusieurs reprises de modèles de base pour effectuer les régressions linéaires sans jamais préciser le modèle spécifique que nous avons finalement employé.

Le design expérimental particulier que nous avons développé requiert le développement d'équations spécifiques. L'annexe B présente les modèles de base qui ont servi au développement des deux équations linéaire et quadratique suivantes.

$$\hat{Y}_{LIN} = \delta_1^0 X_1 + \delta_2^0 X_2 + \delta_3^0 X_3 + \delta_4^0 X_4 + \\ \delta_1^1 X_1 Z_1 + \delta_2^1 X_2 Z_1 + \delta_3^1 X_3 Z_1 + \delta_4^1 X_4 Z_1 + \delta_4^2 X_4 Z_2$$

$$\hat{Y}_{QUAD} = \delta_1^0 X_1 + \delta_2^0 X_2 + \delta_3^0 X_3 + \delta_4^0 X_4 + \\ \delta_1^1 X_1 Z_1 + \delta_2^1 X_2 Z_1 + \delta_3^1 X_3 Z_1 + \delta_4^1 X_4 Z_1 + \delta_4^2 X_4 Z_2 + \\ \delta_{12}^0 X_1 X_2 + \delta_{13}^0 X_1 X_3 + \delta_{14}^0 X_1 X_4 + \delta_{23}^0 X_2 X_3 + \delta_{24}^0 X_2 X_4 + \delta_{34}^0 X_3 X_4 + \\ \delta_{12}^1 X_1 X_2 Z_1 + \delta_{13}^1 X_1 X_3 Z_1 + \delta_{14}^1 X_1 X_4 Z_1 + \delta_{23}^1 X_2 X_3 Z_1 + \delta_{24}^1 X_2 X_4 Z_1 + \\ \delta_{34}^1 X_3 X_4 Z_1 + \delta_{14}^2 X_1 X_4 Z_2 + \delta_{24}^2 X_2 X_4 Z_2 + \delta_{34}^2 X_3 X_4 Z_2 + \\ \delta_1^{11} X_1 Z_1^2 + \delta_2^{11} X_2 Z_1^2 + \delta_3^{11} X_3 Z_1^2 + \delta_4^{11} X_4 Z_1^2 + \delta_4^{22} X_4 Z_2^2 + \delta_4^{12} X_4 Z_1 Z_2 + \\ \delta_{12}^{11} X_1 X_2 Z_1^2 + \delta_{13}^{11} X_1 X_3 Z_1^2 + \delta_{14}^{11} X_1 X_4 Z_1^2 + \delta_{23}^{11} X_2 X_3 Z_1^2 + \delta_{24}^{11} X_2 X_4 Z_1^2 + \\ \delta_{34}^{11} X_3 X_4 Z_1^2 + \delta_{14}^{22} X_1 X_4 Z_2^2 + \delta_{24}^{22} X_2 X_4 Z_2^2 + \delta_{34}^{22} X_3 X_4 Z_2^2 + \\ \delta_{14}^{12} X_1 X_4 Z_1 Z_2 + \delta_{24}^{12} X_2 X_4 Z_1 Z_2 + \delta_{34}^{12} X_3 X_4 Z_1 Z_2$$

La première chose impressionnante en regardant ces 2 équations est la différence entre le nombre de paramètres de chaque équation. En effet, le fait de passer du modèle linéaire au modèle quadratique entraîne une augmentation du nombre de paramètres de 9 à 42. Ces modèles se sont révélés efficaces pour la plupart des propriétés papetières.

Nous possédons maintenant tous les outils nécessaires pour effectuer les régressions et, par le fait même, estimer les coefficients de régression.

3.4 Estimation des coefficients de régression

Il n'y a pas tellement longtemps, l'estimation des coefficients de régression de modèles plus ou moins complexes représentait une tâche pénible et fastidieuse. Maintenant, avec l'avènement d'ordinateurs personnels de plus en plus puissant et de logiciels de plus en plus performants, on peut aisément et rapidement effectuer des régressions linéaires complexes. En fait, le plus difficile est d'interpréter correctement la masse de résultats que les logiciels produisent dans des délais souvent très court.

En ce qui concerne les régressions en tant que tels, nous avons à notre disposition à l'U.Q.T.R. un logiciel ou, plutôt, un progiciel très performant dans le domaine des statistiques qui est disponible sous l'environnement UNIX de l'ordinateur central. Ce progiciel se nomme SAS. Celui-ci est, en réalité, un

ensemble de procédures spécialisées principalement dans les analyses statistiques.

Nous avons vu jusqu'à maintenant que le but principal de la modélisation est de trouver un modèle de régression qui explique le mieux possible les variations des résultats mesurés au laboratoire. Parmi toutes les procédures disponibles dans SAS, nous avons jugé que seulement deux suffisaient : la procédure *REG* et la procédure *RSREG*.

3.4.1 Procédure REG

La procédure *REG* est celle qui permet de déterminer les paramètres significatifs des modèles de régression. Pour utiliser la procédure, il suffit de soumettre à SAS, sous forme de mini-programme, la liste des paramètres qui tiennent compte du design expérimental employé. Dans notre cas, nous avons donc 9 paramètres ou facteurs indépendants à soumettre pour le modèle linéaire et 42 pour le modèle quadratique. SAS effectue ensuite la régression linéaire en tenant compte des options spécifiées. La manière dont SAS effectue l'analyse et présente les résultats dépend ainsi des options fournies lors de la programmation par l'utilisateur. La procédure *REG* est très polyvalente et comme le but de ce travail n'est pas de donner un cours complet sur le système SAS, nous allons seulement expliquer les options qui ont réellement servi. Ceci s'applique aussi à la procédure *RSREG*.

Bien que les deux procédures, REG et RSREG, peuvent toutes les deux estimer les coefficients de régression des facteurs indépendants, nous leur avons donné des responsabilités différentes. Nous avons utilisé la procédure REG pour trouver les modèles (linéaire ou quadratique) de régression dont tous les paramètres inclus dans le modèle sont significatifs à un niveau de confiance de 95%. Le test utilisé par REG pour évaluer le niveau de signification de chaque paramètre est le test d'hypothèse F tel que vu à la section 3.2.3. Quant à la procédure RSREG, son unique fonction a été d'évaluer la somme des carrés de l'erreur pure SC_{EP} . Cette somme des carrés est nécessaire pour effectuer le test du manque d'ajustement. Nous allons voir plus loin que même si RSREG peut effectuer directement le test du manque d'ajustement, nous n'avons pas pu utiliser cette option à 100%. Un exemple de la procédure REG est présenté à la figure 3.1. Il permet de trouver le modèle de régression de l'opacité à partir du modèle de base linéaire.

```
PROC REG      DATA = SASUSER.RESULTAT;
MODEL        OPACITE = X1 X2 X3 X4 X1Z1 X2Z1 X3Z1 X4Z1 X4Z2
              / SELECTION = STEPWISE SLE = 0,05 SLS=0,05;
RUN;
QUIT;
```

Fig. 3.1 : Exemple de la procédure REG

Le mini-programme montré ci-dessus comprend tous les éléments nécessaires pour obtenir les résultats voulus. Cependant, il ne permet pas de vérifier la capacité

ou la puissance de la procédure REG. En effet, il existe 16 autres énoncés qui peuvent être introduits entre l'énoncé MODEL et l'énoncé RUN. De plus, la plupart des énoncés possèdent plusieurs options ou variantes. Voyons maintenant en détail les deux premiers énoncés du programme. Il est à noter que RUN et QUIT indiquent à SAS que l'énumération des énoncés de la ou des procédures est terminée.

L'énoncé PROC indique à SAS la procédure choisie. La partie en italique représente l'une des dix options disponibles avec PROC REG. L'option *DATA =* indique à SAS qu'il doit puiser les données à analyser dans le sous-répertoire *SASUSER* et dans le fichier *RESULTAT*. Le nom du fichier de données peut évidemment être différent de celui que nous avons utilisé. Les données de ce fichier doivent obligatoirement être disposées en colonne avec en tête de colonne la description respective (8 caractères alphanumériques maximum). De plus, il ne doit pas y avoir de rangée libre entre la rangée de la description et celle de la première rangée de données (voir tableau 3.4).

X1	X2	X3	X4	Z1	Z2	X3Z1	X4Z1	X4Z2	X1X3	X2Z1Z1	DECH	OPAC	BLANC
0	1	0	0	-1.41	0	0	0	0	0	1.99	7.1	87.1	58.1
0.33	0	0.33	0.33	1	-1	0.33	0.33	-0.33	0.11	0	10.0	91.2	60.9
0.5	0.5	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0.5	5.9	93.1	57.4
0.25	0.25	0.25	0.25	0	1.41	0	0	0.35	0.06	0	9.7	89.2	60.4

Tableau 3.4 : Exemple de la présentation du fichier de données pour SAS

Le deuxième énoncé, MODEL, désigne à SAS le ou les variables dépendantes (réponses) à être analysées de façon à leur trouver un modèle de régression à partir des variables indépendantes. Dans l'exemple de la figure 3.1, nous avons seulement la variable dépendante *OPACITE* mais on peut ajouter, par exemple, *BLANCHEU* (pour blancheur) et *DECHIRUR* (pour indice de déchirure) en séparant chaque variable par au moins un espace (MODEL *OPACITE BLANCHEU DECHIRUR* = X1 X2 ... ;). Il n'est pas nécessaire que toutes les réponses soient sur la même ligne; l'énoncé peut compter plusieurs lignes. Seul le point-virgule indique à SAS que l'énoncé est terminé.

En ce qui concerne l'énumération des variables indépendantes, il faut spécifier tout le modèle de régression de base dans lequel SAS peut puiser pour trouver le modèle de régression. Il faut donc prévoir toutes les combinaisons possibles entre les facteurs principaux lors de la préparation du fichier de données. Les combinaisons correspondent évidemment au modèle de base. En ce qui nous concerne, notre fichier de données compte 42 colonnes seulement pour les facteurs indépendants car le modèle de base quadratique possède 42 termes. À ces 42 colonnes, il faut ajouter les 9 colonnes pour les facteurs dépendants ou réponses. Il ne faut pas oublier aussi que chaque colonne comporte 144 rangées (144 points expérimentaux). Le fichier de données est donc très imposant. Malgré tout, SAS ne prend que quelques secondes pour trouver les modèles de régression avec des termes ayant un minimum de 95% de confiance. Ce qui implique que, pour seulement quelques minutes de préparation et de programmation, on peut obtenir

des centaines de pages de résultats à analyser. Il est donc important de spécifier uniquement les options nécessaires. En effet, certaines options sont très prolifiques du point de vue de la quantité de résultats produits.

Pour l'énoncé MODEL, nous avons vu jusqu'à maintenant tout ce qui concerne les variables dépendantes et indépendantes. Nous allons maintenant voir les options considérées. La première option suivant le caractère / est *SELECTION = STEPWISE*. Cette option indique à SAS la façon dont il doit rechercher la solution finale ou le modèle de régression. Les méthodes de sélection disponibles sont : FORWARD, BACKWARD, STEPWISE, MAXR, MINR, RSQUARE, ADJRSQ et CP. Pour les trois premières méthodes, SAS recherche le modèle de régression en travaillant avec le niveau de signification de chacun des facteurs indépendants. Pour la méthode FORWARD, par exemple, SAS introduit les facteurs indépendants un-à-un, par ordre décroissant de signification, dans le modèle jusqu'à ce que le niveau de signification des facteurs non-inclus dans le modèle ne corresponde plus au niveau minimal spécifié.

Les autres méthodes de sélection utilisent une caractéristique globale du modèle comme mesure de l'efficacité du modèle de régression. Dans le cas de la méthode RSQUARE, SAS s'appuie sur le coefficient de détermination R^2 pour effectuer le tri entre tous les modèles calculés. Pour éviter d'obtenir d'interminables listes, on spécifie un nombre maximal de modèles à présenter.

La méthode de sélection préconisée pour notre travail est la méthode STEPWISE. Elle possède l'avantage de tenir compte du niveau de signification de chaque facteur du modèle tout au long de la recherche du modèle final. En effet, on peut spécifier le niveau de signification d'entrée (SLE) et de sortie (SLS) qui indiquent à SAS que tous les facteurs à l'extérieur du modèle dont le niveau de signification est plus élevé que le SLE peuvent entrer (un-à-un par ordre décroissant) dans le modèle et tous les facteurs à l'intérieur du modèle dont le niveau de signification est moindre que le SLS doivent sortir du modèle (un-à-un par ordre croissant). Il faut mentionner que SAS recalcule tous les niveaux de signification des facteurs à toutes les étapes et que le SLS a la priorité sur le SLE. Ceci implique que SAS sort les facteurs non-significatifs du modèle avant d'en introduire de nouveaux. C'est pourquoi cette méthode porte le nom de STEPWISE. Cette méthode est en fait un mariage entre FORWARD et BACKWARD puisque les facteurs indépendants sont ajoutés et enlevés du modèle de régression au gré des niveaux de signification (test F).

La méthode STEPWISE possède comme principal désavantage de produire plus de résultats, souvent inutiles, que les autres méthodes. Ceci s'explique par le fait que, pour chaque étape, SAS présente un bilan de l'étape effectuée. Le bilan comprend l'ANOVA de la régression et l'ANOVA des facteurs indépendants. Ceci implique qu'à mesure que le nombre d'étapes augmente et que, par le fait même, le nombre de facteurs dans le modèle augmente aussi, le bilan s'alourdit. Mis à part des cas exceptionnels, les étapes intermédiaires de calculs ne sont pas utiles; seul

le bilan de la dernière étape nous intéresse. SAS ne nous permet malheureusement pas d'éliminer les bilans intermédiaires.

La dernière remarque concernant la procédure REG porte sur SLE et SLS. Ceux-ci sont tous les deux égaux à 0,05 ou 95% de confiance. Nous avons choisi un niveau de confiance de 95% en raison du nombre élevé de points expérimentaux et de répétitions. Il est possible de prendre des valeurs différentes pour ces deux options mais nous avons choisi de prendre la même valeur. Ces choix nous ont donné de bons résultats.

Pour terminer la partie sur la procédure REG, mentionnons qu'il est possible d'obtenir beaucoup plus de détails de nature statistique mais les cinq lignes de programme telles que présentées plus haut sont suffisantes pour obtenir les deux tables d'ANOVA dont nous avons besoin. La première nous donne les résultats concernant les sources de variation RÉGRESSION, ERREUR et TOTALE tandis que la deuxième, nous donne les facteurs indépendants accompagnés de leur coefficient de régression respectif et certains autres détails comme la valeur F . On obtient aussi le R^2 du modèle final. La source de variation ERREUR sera utilisée pour effectuer le test du manque d'ajustement.

3.4.2 Procédure RSREG

Nous avons mentionné au début de ce chapitre que des tests existent pour vérifier l'ajustement d'un modèle de régression aux données recueillies. Parmi les tests existants, il y a le test du manque d'ajustement et ce test est l'une des options disponibles dans la procédure RSREG. Cependant, dans la plupart des cas, le modèle de régression trouvé par RSREG diffère de celui trouvé par REG. Le problème provient du fait que RSREG n'offre pas le choix d'une méthode de sélection comme STEPWISE, FORWARD ou autres. La procédure RSREG prend les facteurs principaux spécifiés par l'utilisateur et effectue automatiquement toutes les combinaisons possibles et les inclus dans le modèle de régression. D'une façon générale, nous avons constaté que le test du manque d'ajustement effectué par RSREG peut différer de celui effectué manuellement en combinant les résultats de REG et RSREG. Par conséquent, nous avons décidé d'opter pour la méthode manuelle de calcul du test du manque d'ajustement. De plus, le design expérimental particulier et, par le fait même, les modèles de régression de base empêchent l'utilisation totale de l'option *LACKFIT* de PROC RSREG puisque cette procédure ne peut pas reproduire nos équations de base.

En résumé, la seule chose qui nous intéresse vraiment de la procédure RSREG est sa capacité de calculer la somme des carrés de l'erreur pure (SC_{EP}). En effet, RSREG décèle les répétitions du design expérimental à partir du fichier de données. C'est pourquoi, il est très important de s'assurer que les différentes

répétitions se suivent convenablement dans le fichier de données. La figure suivante illustre comment on peut programmer la procédure RSREG pour permettre de calculer la SC_{EP} des propriétés papetières.

```
PROC RSREG  DATA = SASUSER.RESULTAT;  
MODEL      OPACITE = X1 X2 X3 X4 Z1 Z2  
           /LACKFIT NOCODE NOOPTIMAL;  
  
RUN;  
QUIT;
```

Fig. 3.2 : Exemple de la procédure RSREG

On remarque que la structure des énoncés est sensiblement la même que pour la procédure REG. De fait, plusieurs procédures de SAS peuvent être utilisées en employant la même structure de base. C'est pourquoi, il est assez facile d'utiliser le système SAS une fois qu'on a appris seulement quelques énoncés de base. En ce qui a trait au premier énoncé, PROC RSREG, celui-ci possède les mêmes options que l'énoncé PROC REG.

Le deuxième énoncé, MODEL, s'apparente aussi beaucoup à celui de PROC REG. On peut toujours spécifier plus d'une réponse à traiter à la fois. Là où il y a une différence entre REG et RSREG, c'est l'énumération des facteurs indépendants à inclure dans le modèle de régression. Avec RSREG, il suffit d'énumérer les facteurs principaux et RSREG s'occupe du reste. Il effectue automatiquement toutes

les combinaisons possibles entre les facteurs principaux. Comme nous l'avons spécifié plus haut, la seule chose qui nous intéresse de la procédure RSREG, c'est le calcul de SC_{EP} et ce calcul est indépendant du choix des facteurs indépendants. Il faut évidemment que les bons facteurs principaux soient énumérés pour indiquer à SAS les facteurs à considérer pour calculer la SC_{EP} .

Voyons maintenant les options de l'énoncé MODEL qui sont *LACKFIT*, *NOCODE* et *NOOPTIMAL*. C'est justement l'option *LACKFIT* qui permet d'effectuer le test du manque d'ajustement et de calculer la SC_{EP} . L'option *NOCODE* spécifie à SAS que les colonnes des facteurs principaux du fichier de données ne doivent pas passer par l'étape de codage (+1 et -1), nos données étant déjà codées. Finalement, l'option *NOOPTIMAL* indique à SAS qu'il n'a pas à calculer la direction du point optimal du système.

Nous possédons maintenant tous les ingrédients pour effectuer la modélisation de nos propriétés papetières. Les résultats de la modélisation sont présentés dans deux tableaux pour chacune des propriétés papetières étudiées. Le premier tableau présente l'ANOVA de la régression et du test du manque d'ajustement tandis que le deuxième présente l'ANOVA des coefficients de régression du modèle.

3.5 Détermination des modèles de régression

Jusqu'à maintenant, nous avons présenté et expliqué les outils qui permettent de modéliser nos observations selon le plan expérimental développé. Dans cette dernière section du chapitre III, nous allons résumer les résultats obtenus et les commenter. De façon à faciliter la présentation des résultats, nous avons rassemblé toutes les tables d'ANOVA détaillées dans les annexes F et G. L'annexe F présente les résultats des propriétés papetières commentées dans ce chapitre. L'annexe G présente les résultats des autres propriétés papetières évaluées en laboratoire. Pour chaque propriété, il y a une table d'ANOVA pour les statistiques concernant les modèles linéaire et quadratique dans leur ensemble. On y retrouve donc les R^2 , le test du manque d'ajustement, le test F , le nombre de paramètres des modèles obtenus et autres détails. Cette première table permet ainsi de comparer le modèle linéaire au modèle quadratique et de choisir celui qui répond le mieux à nos exigences. L'autre table présente l'ANOVA des paramètres individuels du modèle considéré pour effectuer l'étape de l'optimisation.

3.5.1 Commentaires sur le choix des modèles de régression

Pour mieux visualiser les résultats obtenus concernant les modèles de régression, nous avons regroupé les résultats des 9 propriétés papetières que nous considérons comme étant celles qui sont les plus représentatives pour le papier journal (voir tableau 3.5). On y retrouve donc le nombre de paramètres de la

régression (DL_R), la valeur du test F du manque d'ajustement (F_{MA}) accompagnée de la valeur tabulée ($F_{critique}$) et les coefficients de détermination (R^2 et R_A^2). De plus, les cases ombragées montrent le modèle (linéaire ou quadratique) que nous avons choisi pour passer à l'étape de l'optimisation (chapitre IV). D'un premier coup d'oeil, on voit que le seul modèle linéaire répondant à nos critères est celui de la longueur de rupture.

Propriété	Modèle linéaire				Modèle quadratique			
	DL_R	F_{MA}	$F_{critique}$	R^2, R_A^2	DL_R	F_{MA}	$F_{critique}$	R^2, R_A^2
Indice d'égouttage	4	65	1.55	0.9714 0.9706	12	2.55	1.40	0.9981 0.9979
Indice d'éclatement	9	5.96	1.60	0.9985 0.9984	14	2.83	1.60	0.9993 0.9992
Indice de déchirure	9	12.1	1.60	0.9949 0.9946	18	1.54	1.60	0.9993 0.9992
Longueur de rupture	9	1.56	1.60	0.9977 0.9975	12	1.28	1.60	0.9981 0.9979
TEA	9	2.90	1.60	0.9808 0.9795	14	1.83	1.60	0.9876 0.9863
Longueur de rupture humide	9	6.48	1.60	0.9916 0.9910	17	1.96	1.60	0.9973 0.9969
TEA humide	9	11.5	1.60	0.9790 0.9776	22	1.61	1.60	0.9969 0.9963
Opacité	8	160	1.60	0.9989 0.9988	26	5.82	1.60	1.0000 1.0000
Blancheur	4	57	1.60	0.9981 0.9981	13	3.58	1.60	0.9999 0.9999

Tableau 3.5 : Compilation des tables d'ANOVA des modèles de régression

Nous avons déjà expliqué que notre critère de sélection du modèle de régression est le test du manque d'ajustement. Dans le tableau 3.5, il faut donc comparer les colonnes des F_{MA} à celles des $F_{critique}$. Le manque d'ajustement du modèle considéré est significatif à 95% de confiance quand la valeur de F_{MA} est supérieure à celle de $F_{critique}$. On constate ce résultat lorsque le modèle cause plus de variations que l'erreur pure. Rappelons que le manque d'ajustement est le résultat de la soustraction entre la variation non-expliquée par la régression et la variation expliquée par l'erreur expérimentale. Ce qui implique que le manque d'ajustement est la variation qu'on ne peut expliquer autrement que par le manque de précision du modèle. Dans ces conditions, on constate donc que le manque d'ajustement des modèles linéaires est toujours significatifs sauf pour le modèle de la longueur de rupture. C'est pourquoi, tous nos modèles de régression choisis sont de type quadratique à l'exception de celui de la longueur de rupture qui est de type linéaire.

Par ailleurs, on note que le manque d'ajustement des modèles quadratiques est toujours significatif pour la plupart des propriétés. Malgré cette constatation, nous n'avons pas cherché à ajouter d'autres termes d'ordres supérieurs pour plusieurs raisons. Premièrement, les coefficients de détermination obtenus sont très élevés; leur valeur atteint presque 100%. Ce qui veut dire que la variation expliquée par les modèles de régression équivaut pratiquement à celle de la variation totale. Deuxièmement, on remarque que le manque d'ajustement de propriétés comme l'opacité s'est amélioré grandement. La valeur du test F_{MA} est passé de 160 à 5.82

et les coefficients de détermination ont atteint 1.0000. Même si le manque d'ajustement semble encore élevé, on ne peut pas faire vraiment mieux.

La dernière remarque qu'on peut faire concernant le tableau 3.5 est de tracer le bilan du nombre de facteurs dans les modèles. On voit que le nombre de facteurs varient de 9 pour le modèle de la longueur de rupture à 26 pour celui de l'opacité.

3.5.2 Commentaires sur les paramètres estimés des modèles de régression

Tel que mentionné, le tableau 3.6 présente une compilation des résultats obtenus concernant les paramètres des modèles. Les facteurs X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , Z_1 et Z_2 représentent respectivement la PMM, la PTM, la PFD, la PKSBR, le grammage des formettes et le raffinage de la PKSBR. La première colonne inclut tous les facteurs (33 sur une possibilité de 42) qui se retrouvent au moins une fois dans un modèle. Pour les autres colonnes, on a la valeur du paramètre estimé accompagnée, en indice, du rang d'importance dans le modèle. De plus, les facteurs de la première colonne sont classés par ordre importance par rapport à tous les modèles. Par exemple, le facteur X_4 se classe premier parmi les 9 modèles où il apparaît tandis que le facteur X_3X_4 se classe quatorzième par rapport aux autres facteurs.

Par un examen sommaire de ce tableau, on remarque, tout d'abord, qu'il n'y a aucune case de libre dans les quatres premières rangées. En effet, les paramètres des facteurs principaux (X_1 , X_2 , X_3 , X_4) doivent être différents de zéro pour éviter que lorsque la proportion d'un facteur principal atteint 100%, qu'une propriété soit nulle. Par exemple, si le paramètre de X_3 de l'indice d'éclatement était nul, alors un mélange composé de 100% de X_3 avec un grammage de 48 g/m² ($Z_1 = 0$) donnerait un indice d'éclatement dont la valeur serait nulle; ce qui est impossible. Même si nous n'avons pas imposé à SAS d'inclure les facteurs principaux dans tous les modèles, il les a inclut automatiquement. Le seul cas où un facteur principal était absent d'un modèle est celui du modèle linéaire de l'indice d'égouttage.

3.5.2.1 Effets du facteur X_4 (pâte kraft)

Le facteur X_4 est celui qui s'impose le plus sur l'ensemble des modèles. En effet, si on exclut l'opacité, X_4 se classe toujours premier sauf pour l'indice d'égouttage et la longueur de rupture humide où il se classe deuxième. Par conséquent, l'addition de PKSBR dans un mélange est caractérisée par une déviation positive dans le cas des propriétés physiques et par une déviation négative pour une propriété telle que l'opacité. La figure 3.3 illustre le comportement de la déchirure et de l'opacité pour un mélange simple de X_2 et de X_4 . On voit très facilement que l'addition de PKSBR, jusqu'à 30%, entraîne une augmentation substantielle de la déchirure sans que l'opacité n'en soit trop affectée.

Facteur	Indice d'égouttage CSF (ml)	Indice d'éclatement (kPa)	Indice de déchirure (mN)	Longueur de rupture (kg)	TEA (g/cm)	Longueur de rupture humide (x 1000 g)	TEA humide (g/cm)	Opacité (%)	Blancheur (%)
X ₄	371.2 ₂	341.3 ₁	538.7 ₁	410.1 ₁	93.5 ₁	15.34 ₂	7.08 ₁	66.6 ₄	70.7 ₂
X ₃	357.5 ₁	132.2 ₂	446.1 ₂	224.6 ₂	40.7 ₂	7.59 ₄	2.78 ₄	76.7 ₃	76.4 ₁
X ₂	91.0 ₄	114.7 ₃	387.9 ₃	207.6 ₃	26.3 ₃	14.07 ₁	3.36 ₃	93.1 ₁	57.9 ₃
X ₁	42.7 ₈	88.9 ₄	224.1 ₄	181.2 ₄	16.3 ₅	13.03 ₃	3.64 ₂	97.5 ₂	56.4 ₄
X ₄ Z ₁		72.1 ₅	120.4 ₆	81.3 ₅	25.7 ₄	3.63 ₆	1.91 ₆	4.7 ₉	
X ₃ Z ₁		26.9 ₇	110.2 ₆	42.5 ₇	12.1 ₆	2.13 ₁₀	0.90 ₁₀	5.5 ₅	
X ₂ Z ₁		28.2 ₆	95.8 ₇	49.0 ₆	8.9 ₉	3.92 ₅	1.02 ₉	3.4 ₁₀	
X ₁ X ₄	-291.1 ₆	-67.1 ₁₀	407.5 ₈			14.11 ₈	7.85 ₇	34.6 ₇	-23.1 ₆
X ₄ Z ₂	-117.2 ₃	27.3 ₈	-35.6 ₁₁	24.9 ₉	11.7 ₈	2.64 ₉	2.35 ₅	-1.8 ₁₃	
X ₁ X ₃	-353.8 ₅		58.2 ₁₅			4.94 ₁₂	2.66 ₁₃	24.1 ₆	-24.8 ₅
X ₂ X ₄	-150.6 ₉		167.1 ₁₂			8.13 ₁₁	6.69 ₈	21.5 ₈	-22.2 ₈
X ₁ Z ₁		20.4 ₉	54.9 ₉	41.5 ₈	4.6 ₁₂	3.48 ₇	0.96 ₁₁	1.6 ₁₂	
X ₂ X ₃	-243.1 ₇						1.70 ₁₈	14.8 ₁₁	-21.2 ₇
X ₃ X ₄			184.8 ₁₀					6.0 ₁₄	
X ₂ X ₄ Z ₂									2.5 ₁₂
X ₁ X ₂								3.1 ₁₈	2.8 ₉
X ₄ Z ₁ Z ₁					15.1 ₇			-0.7 ₂₀	
X ₁ X ₄ Z ₂	137.7 ₁₀	-29.2 ₁₁			-38.1 ₁₀	-2.24 ₁₆	-1.77 ₁₇	2.3 ₂₂	-2.0 ₁₁
X ₃ X ₄ Z ₁			63.6 ₁₄						
X ₂ X ₄ Z ₁			55.5 ₁₇		-18.5 ₁₁				
X ₁ X ₄ Z ₁		-26.2 ₁₃	100.9 ₁₃		20.0 ₁₄	3.99 ₁₄	1.70 ₁₉	4.7 ₁₅	
X ₄ Z ₂ Z ₂	-12.1 ₁₂	-5.6 ₁₂					0.30 ₂₀		
X ₂ X ₄ Z ₁			58.2 ₁₆			2.48 ₁₇	2.23 ₁₅	3.7 ₁₆	-2.2 ₁₀
X ₁ X ₂ Z ₁						-2.75 ₁₅			
X ₄ Z ₁ Z ₂		5.3 ₁₄				1.03 ₁₃	0.89 ₁₂	0.5 ₂₄	
X ₂ X ₄ Z ₂	105.6 ₁₁						-1.93 ₁₆	2.4 ₂₁	
X ₁ X ₃ Z ₁							1.29 ₂₁		-1.7 ₁₃
X ₃ Z ₁ Z ₁								-0.8 ₁₇	
X ₃ X ₄ Z ₂			46.5 ₁₈				-2.23 ₁₄	1.8 ₂₅	
X ₂ Z ₁ Z ₁								-0.7 ₁₉	
X ₁ X ₄ Z ₁ Z ₁					-16.3 ₁₃			-2.3 ₂₆	
X ₃ X ₄ Z ₂ Z ₂							-0.88 ₂₂		
X ₁ Z ₁ Z ₁								-0.6 ₂₃	

Tableau 3.6 : Compilation des tables d'ANOVA des paramètres estimés

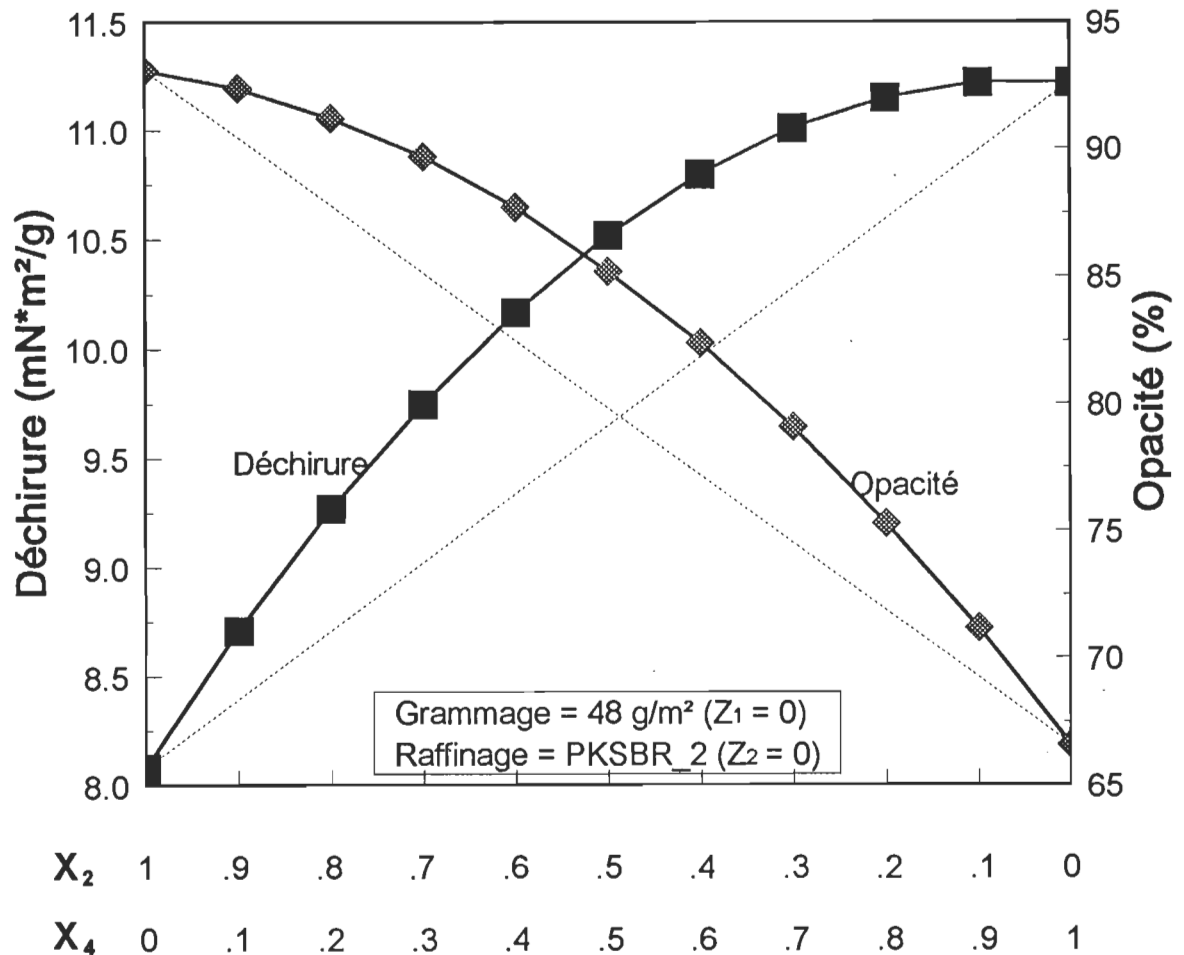


Fig. 3.3 : Comportement des mélanges pour la déchirure et l'opacité en fonction de X_2 et X_4

3.5.2.2 Effets du facteur X_3 (pâte de fibres désencrées)

Les effets du facteur X_3 ne sont pas vraiment prononcés en raison de la présence de la PKSBR. On ne note rien de particulier si ce n'est que l'ordre d'importance global semble se situer quelque part entre la pâte PTM et la PKSBR. Ceci constitue un atout pour cette pâte puisqu'elle peut être utilisée de façon raisonnable sans crainte de perdre certaines propriétés. De plus, si la PKSBR

constitue un composant du mélange, il y a de fortes chances que sa proportion pourra être diminuée.

3.5.2.3 Effets du facteur X_2 (pâte thermomécanique)

L'ordre d'importance des facteurs de l'opacité est un peu surprenant. En effet, SAS a calculé que le facteur X_2 explique une plus grande partie des variations du modèle de régression de l'opacité que le facteur X_1 . La différence entre les deux est cependant très faible. Par contre, parmi les autres termes du modèle, X_2 a beaucoup moins d'influence que X_1 . Cette constatation semble se généraliser en examinant attentivement les facteurs des modèles. En effet, même s'il apparaissent le même nombre de fois parmi les 33 facteurs, l'influence des termes comprenant X_1 semble plus importante que ce soit de façon négative ou positive.

Par ailleurs, tout comme la PMM, la PTM a un effet bénéfique prononcé sur les propriétés physiques du papier à l'état humide. On note que les valeurs des paramètres des facteurs comprenant l'un ou l'autre des facteurs X_1 et X_2 sont relativement élevé.

3.5.2.4 Effets du facteur X_1 (pâte mécanique de meules)

Les effets les plus importants de X_1 semblent être sur les modèles de la déchirure, de la longueur de rupture humide, du TEA humide, de l'opacité et

finalement, de la blancheur. Pour les trois premières propriétés, la combinaison X_1X_4 a un effet bénéfique important sur le modèle. Il ressort que l'addition de fibres courtes favorisent les liens inter-fibres et entraînent l'augmentation des ces trois propriétés. Par contre, l'effet est négatif pour l'indice d'éclatement.

3.5.2.5 Effets du facteur Z_1 (grammage des formettes)

On remarque en examinant le tableau 3.6 que les propriétés physiques contiennent les quatre combinaisons linéaires des facteurs principaux et du facteur Z_1 , comme X_1Z_1 . Ceci s'explique par le fait que le grammage a nécessairement une influence quelconque sur les propriétés. Que cette influence soit linéaire ou non, une augmentation ou une diminution de la matière entraîne inévitablement une variation des propriétés physiques. De nouveau, ce ne sont pas des conditions fixées à SAS; son analyse des observations a démontré que ces combinaisons devaient être incluses dans les modèles de régression. Par ailleurs, on note que pour l'indice d'égouttage et la blancheur, ces combinaisons n'apparaissent pas. Pour l'indice d'égouttage, nous avons fourni à SAS un modèle de base différent puisque l'essai d'égouttement s'effectue avant l'étape de la préparation des formettes. Pour la blancheur, nous avons fourni à SAS le même modèle de base que les autres propriétés et il a lui-même calculé que le grammage ne devait pas être inclut dans le modèle (à l'exception de deux termes). C'était prévisible puisque la technique de la mesure de la blancheur est conçue pour éliminer l'influence du grammage. Les deux termes composés en partie par le facteur Z_1 retrouvés dans le modèle de la

blancheur est peut être une indication que la variation importante de grammage imposée aux formettes a faussé quelque peu les résultats obtenus. Les termes ne sont cependant pas très importants.

En ce qui concerne l'opacité, la revue de la littérature nous a montré que le grammage pouvait avoir une influence non-linéaire sur cette propriété. Les résultats obtenus semblent vérifier cette influence non-linéaire puisque 5 termes parmi les 26 contiennent le facteur Z_7^2 . Ces termes ont tous une influence négative sur l'opacité (signe négatif).

3.5.2.6 Effets du facteur Z_2 (raffinage de la pâte kraft)

Rappelons ici que le facteur Z_2 est indissociable du facteur X_4 , c'est donc le facteur X_4Z_2 qui représente le raffinage de la pâte kraft. L'influence du raffinage sur les propriétés physiques est plutôt de type linéaire car il y a seulement 3 facteurs composé de $X_4Z_2^2$ qui se retrouvent dans l'un ou l'autre des modèles des propriétés physiques. D'ailleurs, le facteur X_4Z_2 est compris dans tous les modèles de ces propriétés et même les modèles de l'indice d'égouttage et de l'opacité. L'importance de ce facteur est relativement élevé.

D'autre part, on retrouve le raffinage de la pâte kraft dans le modèle de la blancheur. Cette présence s'explique en examinant le tableau 3.7 qui illustre les caractéristiques concernant les niveaux de raffinage de la PKSBR. On note qu'à

mesure que l'intensité du raffinage augmente, la blancheur diminue. Elle passe ainsi de 73.3 pour la pâte non-raffinée à 66.2 pour la pâte la plus raffinée.

Caractéristique	PKSBR vierge	PKSBR raffinée				
		_0	_1	_2	_3	_4
Énergie spécifique totale (kWh/TMSA)	-	322	357	560	845	880
Indice d'égouttage CSF (ml)	640	496	440	355	246	186
Grammage (g/m ²)	60.2	58.7	60.4	62.1	59.2	60.3
Volume spécifique (cm ³ /g)	1.85	1.65	1.61	1.54	1.54	1.52
Densité apparente (g/cm ³)	0.54	0.61	0.62	0.65	0.65	0.66
Indice d'éclatement (kPa * m ² /g)	3.91	6.47	6.67	7.24	7.74	7.64
Indice de déchirure (mN * m ² /g)	17.00	12.45	12.86	11.40	11.12	10.39
Résistance du papier à l'état sec						
Longueur de rupture (km)	5.29	7.82	8.15	8.64	8.28	8.19
Allongement à la rupture (%)	2.81	3.78	3.57	3.67	3.36	3.24
Énergie absorbée à la rupture TEA (g/cm)	61	117	116	132	110	103
Résistance du papier à l'état humide (30%)						
Longueur de rupture (m)	198	294	296	341	384	421
Allongement à la rupture (%)	6.1	7.5	7.9	9.7	10.6	11.8
Énergie absorbée à la rupture TEA (g/cm)	3.3	5.0	6.2	8.7	10.5	13.1
Blancheur moyenne ISO (%)	73.3	70.7	70.5	68.4	70.3	66.2
Opacité moyenne ISO (%)	78.8	75.0	74.4	73.6	70.3	71.0
Coefficient de diffusion (m ² /kg)	35.2	29.1	27.3	25.12	23.83	22.39
Coefficient d'absorption (m ² /kg)	0.50	0.51	0.50	0.64	0.51	0.66
Fractions Bauer-McNett (%)						
R14	51.9	47.0	47.8	47.1	48.3	42.6
R28	26.8	29.7	29.0	28.2	25.5	30.1
R48	12.4	12.3	12.3	12.2	11.7	13.0
R100	5.9	5.9	5.9	5.7	5.4	6.8
R200	1.8	2.0	2.0	2.0	2.9	2.7
P200	1.2	3.1	3.2	4.9	6.2	5.0
Longueur moyenne des fibres (mm)	2.32	2.23	2.24	2.21	2.19	2.12

Tableau 3.7 : Caractéristiques de la pâte kraft raffinée

Maintenant que les modèles de régression des propriétés papetières sont déterminés et expliqués, on peut passer à la dernière étape de la méthode des réponses de surface qui est l'optimisation.

CHAPITRE IV

4. OPTIMISATION

La définition de l'optimisation est la recherche des valeurs des paramètres qui maximisent une fonction. Bien que cette définition soit celle du dictionnaire, on ne peut cependant pas l'employer directement pour décrire la dernière grande étape de notre travail. La première raison est que nous possédons plusieurs fonctions. La deuxième est que ce ne sont pas toutes les fonctions qui doivent être maximisées. Notre fonction de coût, que nous définirons plus loin, ne doit évidemment pas être maximisée mais bien minimisée. Une autre raison est qu'il est à peu près impossible de maximiser toutes les propriétés papetières simultanément.

Il faut donc réécrire la définition de l'optimisation pour qu'elle soit représentative du travail à accomplir. Cette nouvelle définition est la recherche des valeurs des paramètres (variables indépendantes) qui maximisent la qualité globale du papier à un coût minimal. Nous verrons qu'il existe une façon détournée de minimiser le coût tout en maximisant une certaine fonction. Cette fonction s'appelle fonction de *désirabilité*.

La fonction de désirabilité est un outil qui permet d'optimiser un ensemble de fonctions sans avoir besoin d'utiliser une représentation graphique des fonctions. Par conséquent, la fonction de désirabilité consiste en une méthode numérique d'optimisation. Ce n'est cependant pas la seule méthode qui permet d'optimiser un système d'équations, il y a aussi la méthode graphique. Chacune de ces méthodes présentent des avantages et des désavantages. Nous avons utilisé les deux méthodes pour effectuer l'optimisation de nos modèles de régression.

Pour bien cerner le travail qu'il reste à accomplir, reprenons la donnée du problème. Nous avons 9 modèles de régression linéaire dont les facteurs principaux sont 4 composants de mélanges et 2 variables de procédé. Les possibilités offertes par ce système sont très nombreuses. On peut imaginer différents scénarios seulement en jouant avec les 4 composants de mélanges (pâtes). Il n'est pas possible de traiter toutes les possibilités dans le cadre de ce travail. Nous avons donc décidé de traiter quelques cas qui représentent bien la réalité industrielle.

4.1 Notions générales sur l'optimisation

Le problème auquel nous sommes confrontés est l'optimisation d'un système à réponses multiples. Ce système est particulier puisqu'on ne cherche pas qu'à optimiser une seule propriété mais bien à optimiser simultanément un système de propriétés de façon à obtenir une combinaison désirable de nos propriétés papetières.

4.1.1 Fonction de désirabilité globale

Une façon de procéder à l'optimisation consiste à incorporer plusieurs réponses dans une seule fonction objective. C'est pourquoi nous avons utilisé ce qu'on appelle une fonction de désirabilité globale (D). Cette fonction est un produit de fonctions de désirabilité ou de qualités normalisées individuelles (d_i) associées à nos propriétés papetières.

$$D = \left[\prod_{i=1}^n d_i^{r_i} \right]^{\frac{1}{\sum r_i}}$$

où l'exposant r_i est utilisé pour donner plus ou moins d'importance à chacune des fonctions de désirabilité individuelles. Nous verrons qu'il est possible d'orienter la recherche des paramètres optimaux en utilisant différents exposants. L'exposant global du produit $\frac{1}{\sum r_i}$ permet le regroupement des propriétés à optimiser sous forme d'une moyenne géométrique. L'inconvénient majeur de l'utilisation de différents exposants r_i est que la fonction D peut devenir plus subjective qu'objective. C'est pourquoi, après avoir effectué quelques essais préliminaires, nous avons fixé les exposants r_i . Les exposants choisis nous assurent un meilleur équilibre entre les valeurs optimales de l'opacité, de la déchirure et du coût global du mélange.

Par ailleurs, lorsqu'un regroupement de propriétés est aussi diversifié que le nôtre, il arrive que des propriétés doivent être maximisées tandis que d'autres doivent être minimisées. C'est le cas du coût de notre mélange optimal de pâtes.

La qualité normalisée d_i peut donc être définie par deux relations : la première est employée pour une propriété qui doit être maximisée ($d_{i, \max}$) et la deuxième, pour une propriété qui doit être minimisée ($d_{i, \min}$).

$$d_{i, \max} = \frac{Y_i - Y_{i, \min}}{Y_{i, \max} - Y_{i, \min}}$$

$$d_{i, \min} = \frac{Y_{i, \max} - Y_i}{Y_{i, \max} - Y_{i, \min}}$$

où $Y_{i, \min}$ est la valeur minimale de la réponse Y_i et $Y_{i, \max}$ est la valeur maximale de la réponse Y_i . Pour vérifier la plage de valeurs que la fonction D peut prendre, voyons la plage de valeurs des deux fonctions ci-dessus :

$$d_{i, \max} = \lim_{Y_i \rightarrow Y_{i, \min}} \frac{Y_i - Y_{i, \min}}{Y_{i, \max} - Y_{i, \min}} = 0$$

$$d_{i, \max} = \lim_{Y_i \rightarrow Y_{i, \max}} \frac{Y_i - Y_{i, \min}}{Y_{i, \max} - Y_{i, \min}} = 1$$

$$d_{i, \min} = \lim_{Y_i \rightarrow Y_{i, \min}} \frac{Y_{i, \max} - Y_i}{Y_{i, \max} - Y_{i, \min}} = 1$$

$$d_{i, \min} = \lim_{Y_i \rightarrow Y_{i, \max}} \frac{Y_{i, \max} - Y_i}{Y_{i, \max} - Y_{i, \min}} = 0$$

On constate que les plages de valeurs varient de 0 à 1, ce qui implique que la fonction D varie de 0 à 1 aussi.

4.1.2 Fonction de désirabilité globale adaptée

Suite à l'étape de modélisation, nous avons effectué quelques essais préliminaires avec GAMS pour voir de quelles façons se comportait notre système d'équations. Les essais ont été réalisés en incorporant quelques normes de qualité (voir tableau 4.1) que le papier journal doit posséder. Ces spécifications proviennent d'articles de référence concernant le papier journal en général. Il est à noter qu'en plus de la fonction de désirabilité, on peut introduire des conditions particulières (contraintes) dans le fichier de données de GAMS de manière à ce que celui-ci en tienne compte dans la recherche du mélange optimal. Aux annexes C et D, on retrouve respectivement des exemples représentatifs du fichier de départ et du fichier de résultats produit par GAMS. GAMS est un logiciel qui permet entre autres de minimiser ou maximiser une fonction ou un ensemble de fonctions de façon itérative. Nous avons utilisé la version étudiante numéro 2.05.

Plusieurs points importants ont été retenus de ces essais. Dans un premier temps, nous avons constaté que seulement trois propriétés, l'indice d'égouttage, la déchirure et l'opacité, géraient l'ensemble des autres propriétés. En effet, il apparaît que lorsque les normes de ces trois propriétés sont satisfaites, les normes des autres propriétés sont automatiquement satisfaites. Ceci est une constatation importante puisqu'elle permet de simplifier la fonction de désirabilité. Elle sera ainsi composée, entre autres, de la fonction pour la déchirure et de celle de l'opacité. Nous n'avons pas considéré l'indice d'égouttage comme étant une propriété à optimiser. Nous

avons seulement imposé à GAMS que le mélange optimal doit respecter les normes de l'indice d'égouttage telles que spécifiées au tableau 4.1.

On peut expliquer le phénomène précédent en examinant la façon dont la déchirure et l'opacité sont développées dans un mélange. Pour faciliter l'explication, prenons un mélange simple : de la PMM et de la PKSBR. Nous avons déjà vu que la PMM est la championne en ce qui a trait à l'opacité. Par contre, la plupart de ses propriétés mécaniques sont inférieures à celles des autres pâtes. À l'inverse, la PKSBR possède d'excellentes propriétés mécaniques mais fait piètre figure au chapitre de l'opacité. Par conséquent, il semble que le fait de mélanger ces deux pâtes ensemble tout en s'arrangeant pour rencontrer les normes de qualités pour la déchirure et l'opacité entraîne que toutes les normes de qualité des autres propriétés sont automatiquement respectées. Quoi qu'il en soit, nous avons contraint GAMS à respecter toutes les normes de qualité du tableau 4.1.

Propriété	Plage acceptable	
	Valeur minimale	Valeur maximale
Indice d'égouttage (ml CSF)	100	150
Indice d'éclatement (kPa*m ² /g)	1.6	-
Indice de déchirure (mN*m ² /g)	8.0	-
Longueur de rupture (km)	3.2	-
Opacité (%)	89	-
Blancheur (%)	55	-

Tableau 4.1 : Normes de qualité du papier journal

Maintenant que nous avons cerné le problème à résoudre, nous pouvons nous attaquer à la fonction principale de désirabilité. Nous avons vu que tout ce dont nous avons besoin d'inclure dans cette fonction est la déchirure, l'opacité et, bien-sûr, le coût. Nous savons que la déchirure et l'opacité sont deux propriétés importantes que les fabricants emploient pour caractériser leurs produits. Ce sont évidemment deux propriétés à maximiser et, par conséquent, il faut prendre $d_{i, \max}$ pour les représenter dans la fonction de désirabilité D . En ce qui concerne le coût du mélange, il n'y a aucun doute qu'il faut le minimiser et ce sera donc $d_{i, \min}$ qu'on devra inclure dans D pour représenter le coût. De plus, nous avons ajouté dans certains cas une fonction qui permet de maximiser la proportion de PFD du mélange. La fonction de désirabilité D adaptée à notre problème devient :

$$D = \left[d_{1, \max}^{r_1} \times d_{2, \max}^{r_2} \times d_{3, \min}^{r_3} \times d_{4, \max}^{r_4} \right]^{\frac{1}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}}$$

avec :

$$d_{1, \max} = \frac{\text{Déchirure} - \text{Déchirure}_{\min}}{\text{Déchirure}_{\max} - \text{Déchirure}_{\min}}$$

$$d_{2, \max} = \frac{\text{Opacité} - \text{Opacité}_{\min}}{\text{Opacité}_{\max} - \text{Opacité}_{\min}}$$

$$d_{3, \min} = \frac{\text{Coût}_{\max} - \text{Coût}}{\text{Coût}_{\max} - \text{Coût}_{\min}}$$

$$d_{4, \max} = \frac{X_3 - X_{3, \min}}{X_{3, \max} - X_{3, \min}}$$

Dans ces quatre dernières fonctions de qualité normalisées, on remarque qu'il y a des termes qui ne sont pas indicés par *max* ou *min* (**Déchirure**, **Opacité**, **Coût**, **X₃**). La valeur de ces termes est calculée par GAMS au cours du processus itératif d'optimisation. Les autres termes sont les valeurs minimales et maximales que les différentes fonctions peuvent prendre. Il est très important d'évaluer correctement ces valeurs car la fonction de désirabilité globale *D* est élevée à l'exposant $\frac{1}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}$. Ceci implique que le produit des quatre fonctions normalisées ne doit pas être une valeur négative car on aurait alors la racine d'une valeur négative qui est un nombre imaginaire.

Il est très important de bien évaluer les valeurs minimales et maximales que les modèles de régression peuvent prendre car, durant le processus itératif, GAMS peut explorer n'importe quelle région du domaine des modèles. Si par hasard, GAMS obtient une valeur inférieure à la valeur minimale ou supérieure à la valeur maximale, un nombre imaginaire pourrait en résulter et engendrer une erreur pour GAMS. À ce moment, le processus itératif est arrêté. Nous allons donc évaluer pour les quatre fonctions, les valeurs minimales et maximales et, ainsi que les différents exposants associés à ces fonctions.

4.1.2.1 Fonction de désirabilité de la déchirure

Pour le modèle de la déchirure, la valeur minimale correspond au mélange composé exclusivement de PMM ($X_1 = 1$) et avec un grammage de 36 g/m²

($Z_1 = -1.41$). La valeur minimale est donc 4.0 mN*m²/g. De façon similaire, la valeur maximale est obtenue lorsque le mélange est composé exclusivement de PKSBR ($X_4 = 1$) raffinée au taux minimal ($Z_2 = -1.41$ ou 257 kWh/TMSA) et avec un grammage maximal ($Z_1 = 1.41$ ou 60 g/m²). La valeur maximale obtenue est 12.6 qu'on arrondit à 13.0 mN*m²/g.

Suite à quelques essais, nous avons pu déterminer que l'exposant qui permet de donner l'importance voulue à la déchirure est 1 (voir prochaine section). La fonction de désirabilité de la déchirure devient ainsi :

$$d_1^{r_1} = \left(\frac{\text{Déchirure} - 4.0}{13.0 - 4.0} \right)^1 = \frac{\text{Déchirure} - 4.0}{9.0}$$

où *Déchirure* est le modèle de la déchirure tel que déterminé au chapitre 3 :

$$\begin{aligned} \text{Déchirure} = & (224.13 X_1 + 387.92 X_2 + 446.13 X_3 + 538.68 X_4 + 54.92 X_1 Z_1 + \\ & 95.77 X_2 Z_1 + 110.18 X_3 Z_1 + 120.38 X_4 Z_1 - 35.59 X_4 Z_2 + 58.17 X_1 X_3 + \\ & 407.49 X_1 X_4 + 167.13 X_2 X_4 + 184.80 X_3 X_4 + 100.90 X_1 X_4 Z_1 + 58.17 X_2 X_4 Z_1 + \\ & 63.57 X_3 X_4 Z_1 + 46.50 X_3 X_4 Z_2 + 55.49 X_2 X_4 Z_1 Z_1) / \text{Grammage} \end{aligned}$$

4.1.2.2 Fonction de désirabilité de l'opacité

En ce qui a trait au modèle de l'opacité, la valeur minimale correspond au cas où le mélange serait composé entièrement de PKSBR ($X_4 = 1$) raffinée avec 945 kWh/TMSA ($Z_2 = 1.41$). L'opacité est aussi minimale lorsque le grammage est de 36 g/m² ($Z_1 = -1.41$). On obtient donc comme opacité minimale 55%. Par ailleurs,

la valeur maximale correspond au mélange contenant seulement de la PMM ($X_1 = 1$) et avec un grammage de 60 g/m² ($Z_1 = 1.41$). L'opacité obtenue pour ces conditions étant très près de 100%, c'est cette valeur que nous avons choisie comme opacité maximale. La fonction de désirabilité de l'opacité devient donc :

$$d_2'^2 = \left(\frac{\text{Opacité} - 55}{100 - 55} \right)^3 = \left(\frac{\text{Opacité} - 55}{45} \right)^3$$

où l'exposant 3 est celui permettant d'équilibrer l'importance entre la déchirure et l'opacité et *Opacité* est le modèle de l'opacité tel que déterminé au chapitre 3.

$$\begin{aligned} \text{Opacité} = & 97.54 X_1 + 93.10 X_2 + 76.70 X_3 + 66.61 X_4 + 1.62 X_1 Z_1 + 3.41 X_2 Z_1 + \\ & 5.54 X_3 Z_1 + 4.71 X_4 Z_1 - 1.76 X_4 Z_2 + 0.48 X_4 Z_1 Z_2 - 0.60 X_1 Z_1 Z_1 - \\ & 0.71 X_2 Z_1 Z_1 - 0.79 X_3 Z_1 Z_1 - 0.67 X_4 Z_1 Z_1 + 3.11 X_1 X_2 + 24.10 X_1 X_3 + \\ & 34.63 X_1 X_4 + 14.85 X_2 X_3 + 21.52 X_2 X_4 + 5.95 X_3 X_4 + 4.66 X_1 X_4 Z_1 + \\ & 3.72 X_2 X_4 Z_1 + 2.29 X_1 X_4 Z_2 + 2.39 X_2 X_4 Z_2 + 1.76 X_3 X_4 Z_2 - 2.31 X_1 X_4 Z_1 Z_1 \end{aligned}$$

En ce qui concerne l'exposant des fonctions de désirabilité, il s'avère parfois nécessaire de choisir des exposants dont la valeur est différente de 1 pour plusieurs raisons. Dans notre cas, ce choix des exposants s'explique par le fait que nous devons rencontrer des normes minimales ou maximales pour les propriétés papetières. En effet, prenons la déchirure et l'opacité et voyons la valeur obtenue pour leur fonction de désirabilité respective quand nous remplaçons *Déchirure* et *Opacité* par leur norme minimale.

$$d_1 = \left(\frac{8 - 4}{9} \right) = .44$$

$$d_2^3 = \left(\frac{89 - 55}{45} \right)^3 = (.76)^3 = .43$$

On remarque que, si on oublie les exposants 1 et 3, la désirabilité des fonctions est différente lorsque la norme minimale est rencontrée. Ceci implique que pour optimiser le système, GAMS cherchera seulement à maximiser la déchirure puisque c'est sa désirabilité individuelle qui diminue la désirabilité globale D . Quelques essais préliminaires nous ont en effet démontré que le mélange optimal obtenu possédait une déchirure maximisée et une opacité de 89% soit la norme minimale. Pour corriger cette situation, nous avons donc choisi l'exposant 3 pour la fonction de désirabilité de l'opacité. Par conséquent, GAMS devra optimiser le mélange de façon à maximiser également la déchirure et l'opacité pour que la désirabilité globale D puisse être maximisée.

4.1.2.3 Fonction de désirabilité du coût

Avant de parler de valeur minimale ou maximale pour notre fonction de coût, il faut, tout d'abord, définir la fonction en elle-même.

$$COÛT_{MÉL} = C_{PMM} \cdot X_1 + C_{PTM} \cdot X_2 + C_{PFD} \cdot X_3 + [C_{PKSBR} + (RAFF \cdot C_{kWh})] \cdot X_4$$

où C_{PMM} , C_{PTM} , C_{PFD} et C_{PKSBR} représentent le coût respectif moyen des pâtes en dollars par tonne métrique séchée à l'air (\$/TMSA), C_{kWh} est le coût moyen d'un kWh (\$/kWh) tel que facturé par Hydro-Québec, X_i est la fraction massique des pâtes et $RAFF$ représente l'énergie spécifique de raffinage appliquée à la PKSBR. La variable $RAFF$ est associée à la variable Z_2 par la relation :

$$RAFF = (244 \cdot Z_2) + 601$$

Cette relation permet en fait de décoder la variable Z_2 qui provient de notre design expérimental CCD. Nous avons vu que pour Z_2 et Z_1 , les niveaux spécifiés par le CCD sont -1.41, -1, 0, +1 et +1.41. Maintenant que tous les essais en laboratoire ont été réalisés, on peut associer ces niveaux à des valeurs réelles qui sont respectivement 257, 357, 601, 845 et 945 kWh/TMSA. Avec ces valeurs et, plus spécifiquement, 357 et 845, on peut calculer les deux valeurs qui se retrouvent dans la relation ci-dessus. Le nombre 244 est calculé en prenant la moitié de la différence entre 845 et 357. Le nombre 601 représente la moyenne entre 845 et 357.

Le tableau 4.2 montre les différents coûts utilisés pour réaliser l'étape de l'optimisation. Ces coûts nous ont été fournis par quelques usines de papiers de la Mauricie. Il est important de noter que le coût de production de ces pâtes varie d'une usine à l'autre car il y a plusieurs facteurs à considérer pour le calculer. Le coût dépend, entre autres, de la capacité de l'usine, du nombre total de personnes employées et du coût de la matière première. Pour la PKSBR, le coût indiqué est

celui que doit payer l'usine pour se l'approprier soit le prix du marché. Ce prix, particulièrement sensible, peut varier rapidement ; l'année 1994 en est un bon exemple.

Description	Coût
PMM	275 \$/TMSA
PTM	250 \$/TMSA
PFD	450 \$/TMSA
PKSBR	700 \$/TMSA
Énergie électrique fournie par Hydro-Québec	0.04 \$/kWh

Tableau 4.2 : Coûts utilisés pour effectuer l'optimisation

Maintenant que la fonction de coût est définie et que les coûts individuels des pâtes sont établis, on peut calculer les valeur minimale et maximale de la fonction. La valeur minimale correspond évidemment à un mélange de 100% de PTM soit 250 \$/TMSA. La valeur maximale correspond à la situation où le mélange est composé uniquement de PKSBR raffinée au maximum soit à 945 kWh/TMSA. Le coût maximal du mélange est donc 750 \$/TMSA (valeur arrondie). La fonction de désirabilité du coût devient finalement :

$$d_3^{r_3} = \left(\frac{750 - \text{Coût}}{750 - 250} \right)^{r_3} = \frac{750 - \text{Coût}}{500}$$

où *Coût* est la fonction de coût définit précédemment. On remarque que l'exposant r_3 est égal à 1.

4.1.2.4 Fonction de désirabilité de la pâte désencrée

Une fonction de désirabilité pour la PFD a été ajoutée à la fonction de désirabilité globale dans certains cas pour évaluer les effets de l'introduction de la PFD dans notre mélange optimal. Cette fonction permet d'optimiser l'introduction de la PFD en fonction du coût du mélange et des propriétés papetières. Si on oublie la façon dont GAMS effectue ses calculs, la fonction de désirabilité de la PFD devrait être définie par :

$$d_4^{r_4} = \left(\frac{PFD - 0}{0.4 - 0} \right) = \frac{PFD}{0.4}$$

où PFD est la proportion de pâte désencrée du mélange (X_3) et l'exposant r_4 est égal à 1. On remarque que la valeur maximale associée à la PFD est 0.4. Nous avons en effet limité notre étude à une proportion maximale de 40% de PFD. D'ailleurs, il est fort peu probable que GAMS puisse obtenir un mélange optimal qui rencontrerait tous nos critères et qui contiendrait une forte proportion de PFD tel que 75%. Le coût de base de la PFD et ses propriétés papetières ne le permettent pas. En introduisant ainsi la proportion maximale que nous avons imposée à GAMS dans la fonction de désirabilité, on permet à celle-ci de varier entre 0 et 1 comme les autres fonctions. Mentionnons que l'introduction d'une contrainte dans la section de la définition des équations dans GAMS est nécessaire pour s'assurer que celui-ci respectera cette condition. La fonction de désirabilité ne permet que de refléter la contrainte.

Malheureusement, la façon dont GAMS effectue ses calculs ne nous permet pas d'utiliser la fonction de désirabilité telle que présentée ci-dessus. En effet, si on demande à GAMS d'optimiser notre système d'équations, il obtient toujours une erreur qui l'oblige à arrêter le processus itératif. Pour contourner cette difficulté, nous avons dû modifier quelque peu la fonction de désirabilité de la PFD.

$$d_4' = \left(\frac{PFD + 0.0001}{0.4} \right)^{0.2}$$

où 0.0001 permet d'éviter ce qui semble être une division par zéro pour GAMS et l'exposant 0.2 a été introduit pour rétablir l'équilibre dans la fonction de désirabilité globale. En effet, du point de l'optimisation, il est très facile pour GAMS d'inclure 40% de PFD dans le mélange optimal sans trop affecter le coût global du mélange et ainsi augmenter de façon significative la désirabilité globale puisque la désirabilité d_4 est égale à 1. La présence de l'exposant 0.2 diminue l'impact de la désirabilité d_4 et oblige ainsi GAMS à améliorer la désirabilité globale D autrement que par la seule addition de PFD. Il est à noter que d_4 varie quand même de 0 à 1.

Tous les paramètres de l'optimisation sont maintenant définis. Les prochaines sections portent sur différents cas (voir tableaux 4.3 et 4.4) qui permettront d'évaluer les possibilités offertes par tout ce qui a été effectué jusqu'à présent. La fonction de désirabilité globale telle que définie précédemment est présentée ici pour résumer.

$$D = \left[\left(\frac{\text{Déchirure} - 4.0}{9.0} \right) \left(\frac{\text{Opacité} - 55}{45} \right)^3 \left(\frac{750 - \text{Coût}}{500} \right) \left(\frac{PFD + 0.0001}{0.4} \right)^{0.2} \right]^{0.192}$$

Cas n°	Description
1	Optimisation sans condition initiale particulière
2	Optimisation avec maximisation de la proportion de PFD
3	Effets de l'introduction de PFD
4	Effets de la variation du grammage sans condition initiale particulière
5	Effets de la variation du grammage avec maximisation de la proportion de PFD
6	Effets de la variation du coût de la PFD
7	Effets de la variation du coût de la PKSBR

Tableau 4.3 : Description des cas d'optimisation analysés

Condition	Cas n°						
	1	2	3	4	5	6	7
Proportion de PFD (%)	0-40	0-40	0 10 20 30 40	0-40	0-40	0-40	0-40
Maximisation de la proportion de la PFD	non	oui	-	non	oui	oui	non
Grammage (g/m ²)	48	48	48	48 46 44 42	48 46 44 42	48	48
Coût de la PFD	450	450	450	450	450	350 450 550	450
Coût de la PKSBR	700	700	700	700	700	700	550 700 850

Tableau 4.4 : Conditions initiales associées aux cas d'optimisation

Le tableau 4.4 montre les différentes conditions initiales imposées à GAMS en association avec les sept cas d'optimisation. Pour la proportion de PFD, le seul cas où on impose à GAMS une proportion fixe de PFD est le cas n°3. Celui-ci permet d'évaluer les effets de l'introduction de la PFD sur les propriétés du mélange optimal. De plus, la rangée suivante indique si la fonction de désirabilité globale inclut la fonction de désirabilité individuelle de la PFD (fonction d_4) qui permet de maximiser la quantité de PFD comprise dans le mélange tout en tenant compte de tous les autres facteurs.

Le grammage utilisé pour effectuer l'optimisation a été de 48 g/m² sauf pour les cas n°4 et 5 où nous avons évalué les effets de la diminution du grammage sur le mélange optimal. La seule différence entre le cas n°4 et le cas n°5 est la maximisation de la proportion de PFD dans le mélange (fonction d_4 incluse dans D pour le cas n°5).

Les deux derniers cas étudiés sont ceux où nous avons effectué une analyse économique simple. Nous avons fait varier le coût de la PFD de ± 100 \$ pour le cas n°6 et le coût de la PKSBR de ± 150 \$ pour le cas n°7. Ces variations de coût correspondent à environ $\pm 20\%$.

4.2 Étude du cas n°1

Ce premier mélange optimal est obtenu lorsque les quatre pâtes vierges sont soumises à GAMS comme étant équivalentes. Les résultats associés à ce mélange optimal sont montrés au tableau 4.5. Ces premiers résultats expliquent en bonne partie la raison qui a poussé les fabricants de papier journal, entre autres, à modifier leur unité de production de PMM pour de la PTM. Cette pâte réussit presque à 100% à rencontrer les spécifications du papier tant au point de vue des propriétés optiques que des propriétés physiques. D'après ces résultats, il semble donc possible de produire du papier journal à partir de 100% PTM en effectuant une optimisation des facteurs influençant la qualité de la PTM produite.

Pour la PKSBR qui est ajoutée en faible quantité dans le mélange, on voit que GAMS a choisi la PKSBR dont le taux de raffinage est minimal. Ceci s'explique par le fait que la PKSBR non-raffinée possède un indice de déchirure très supérieure aux autres pâtes. Ces premiers résultats semblent donc indiquer que nous n'aurions pas eu besoin d'inclure le taux de raffinage de la PKSBR dans notre plan expérimental.

La figure 4.1 illustre de façon graphique la position du mélange optimal en fonction du coût, de la déchirure et de l'opacité. La région ombragée montre la zone qui respecte l'ensemble des contraintes imposées au mélange optimal. Dans ce cas-ci, la zone admissible est délimitée par un indice d'égouttage de 150 ml CSF maximal et par un indice d'égouttage de 100 ml CSF minimal. Cette dernière limite

correspond à la courbe de niveau du coût de 280 \$/TMSA. En résumé, tout mélange des trois pâtes PTM, PFD et PKSBR qui respecte les indices d'égouttage minimal et maximal rencontrera les spécifications de qualité du papier journal.

Description	Résultat
PTM X_2 (%)	93.6
PKSBR X_4 (%)	6.4
Grammage Z_1 (g/m ²)	48
Raffinage Z_2 (kWh/TMSA)	257
Indice d'égouttage (ml CSF)	100
Indice d'éclatement (kPa*m ² /g)	2.6
Indice de déchirure (mN*m ² /g)	8.6
Longueur de rupture (km)	4.5
TEA (g/cm)	29.5
Longueur de rupture humide (m)	300
TEA humide (g/cm)	4.0
Opacité (%)	92.6
Blancheur (%)	57.7
Coût global du mélange (\$/TMSA)	279

Tableau 4.5 : Résultats obtenus pour le cas n°1

C'est intéressant de constater la facilité à laquelle un graphique tel que celui de la figure 4.1 permet de visualiser toutes les possibilités de mélanges qui respectent les spécifications de qualité. De plus, tout ceci s'effectue parallèlement au coût approximatif des différents mélanges. Un tel graphique triangulaire permet d'illustrer des mélanges de type ternaire (surface intérieure) tout aussi bien que de

type binaire (arêtes). Pour représenter des mélanges de type quaternaire, il faudrait utiliser un tétraèdre. La visualisation deviendrait alors beaucoup plus difficile.

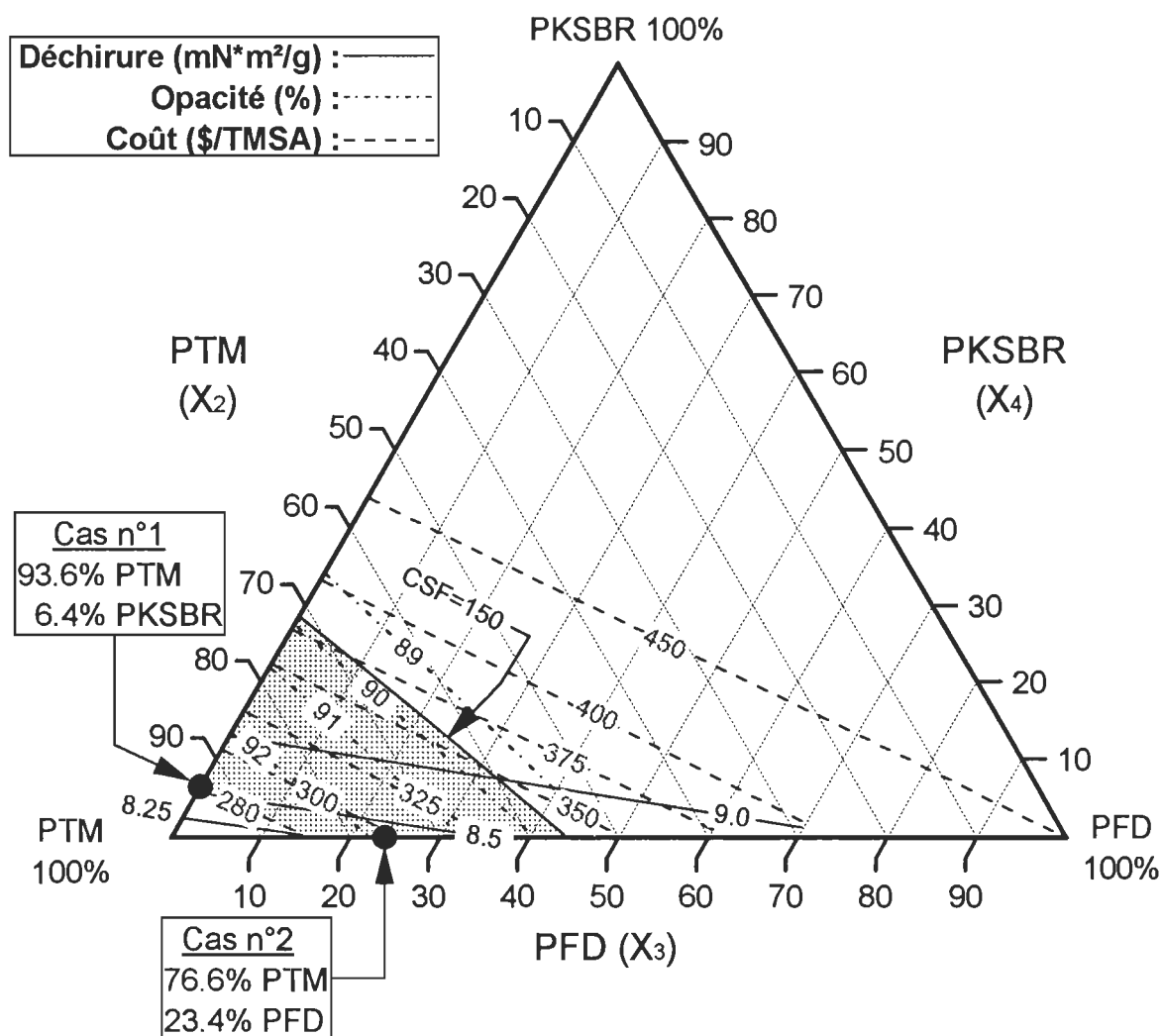


Fig. 4.1 : Graphique des résultats obtenus pour les cas n°1 et n°2

4.3 Étude du cas n°2

Le deuxième cas général étudié est celui où nous avons utilisé les mêmes conditions initiales que pour la section précédente. La différence est que pour ce deuxième cas, nous avons inclus la fonction de désirabilité reliée à la PFD (d_4) dans la fonction de désirabilité globale (D). Les résultats obtenus sont présentés au tableau 4.6. Le mélange optimal est à nouveau un mélange binaire. Ce mélange binaire est aussi illustré à la figure 4.1. On note que la plupart des propriétés de ce deuxième mélange sont moins élevées que dans le premier cas (tableau 4.5) sauf en ce qui a trait à la blancheur et au TEA. De plus, le coût du mélange est de 17.33 \$/TMSA plus élevé. Une première constatation importante est que le remplacement de la PKSBR par de la PFD n'améliore pas vraiment la qualité du papier. On voit que l'indice de déchirure est passablement affectée par l'addition de la PFD. Un examen attentif du graphique de la figure 4.1 permet de constater que les deux mélanges obtenus équilibrent efficacement le coût, la déchirure, l'opacité et, pour le cas n°2, la proportion de PFD qui est presque de 25%.

Description	Résultat
PTM X_2 (%)	76.6
PFD X_3 (%)	23.4
Grammage Z_1 (g/m ²)	48
Indice d'égouttage (ml CSF)	110
Indice d'éclatement (kPa*m ² /g)	2.5
Indice de déchirure (mN*m ² /g)	8.4
Longueur de rupture (km)	4.4
TEA (g/cm)	29.6
Longueur de rupture humide (m)	262
TEA humide (g/cm)	3.5
Opacité (%)	91.9
Blancheur (%)	58.5
Coût global du mélange (\$/TMSA)	297

Tableau 4.6 : Résultats obtenus pour le cas n°2

4.4 Étude du cas n°3

Le but de cette section est d'évaluer les effets de l'introduction de la PFD en proportion fixe sur le mélange optimal. Toujours en utilisant GAMS, nous avons fixé cinq proportions de PFD à respecter soient 0, 10, 20, 30 et 40% et GAMS a pu déterminer cinq mélanges optimaux différents. Les résultats sont présentés au tableau 4.7.

Description	Proportion de PFD X_3 (%)				
	0	10	20	30	40
PMM X_1 (%)	0	0	0	2.8	13
PTM X_2 (%)	93.6	87.7	80	67.2	47
PKSBR X_4 (%)	6.4	2.3	0	0	0
Raffinage Z_2 (kWh/TMSA)	257	257	-	-	-
Grammage Z_1 (g/m ²)	48	48	48	48	48
Indice d'égouttage (ml CSF)	100	100	105	118	127
Indice d'éclatement (kPa*m ² /g)	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5
Indice de déchirure (mN*m ² /g)	8.6	8.4	8.3	8.4	8.2
Longueur de rupture (km)	4.5	4.4	4.4	4.4	4.4
TEA (g/cm)	29.5	28.9	29.2	30.3	30.8
Longueur de rupture humide (m)	300	282	266	253	242
TEA humide (g/cm)	4.0	3.7	3.5	3.6	3.6
Opacité (%)	92.6	92.6	92.2	91.6	91.3
Blancheur (%)	57.7	57.9	58.2	59.0	60.0
Coût global du mélange (\$/TMSA)	279	281	290	311	333

Tableau 4.7 : Résultats obtenus pour le cas n°3

On remarque, tout d'abord, que la déchirure et l'opacité sont passablement affectées par l'imposition d'une proportion fixe de PFD. Le coût est aussi très affecté puisqu'il en coûte 50 \$/TMSA de plus pour produire le même papier. Ensuite, on constate que GAMS utilise deux combinaisons pour les trois mélanges de type ternaire des proportions de 10, 30 et 40 % de PFD pour rencontrer les spécifications. Pour la proportion de 10%, on a un mélange composé de PTM, PFD et PKSBR. Pour les proportions de 30 et 40%, on a des mélanges composés de PMM, PTM et PFD. Les figures 4.2 et 4.3 illustrent les résultats obtenus pour les cinq mélanges du cas n°3.

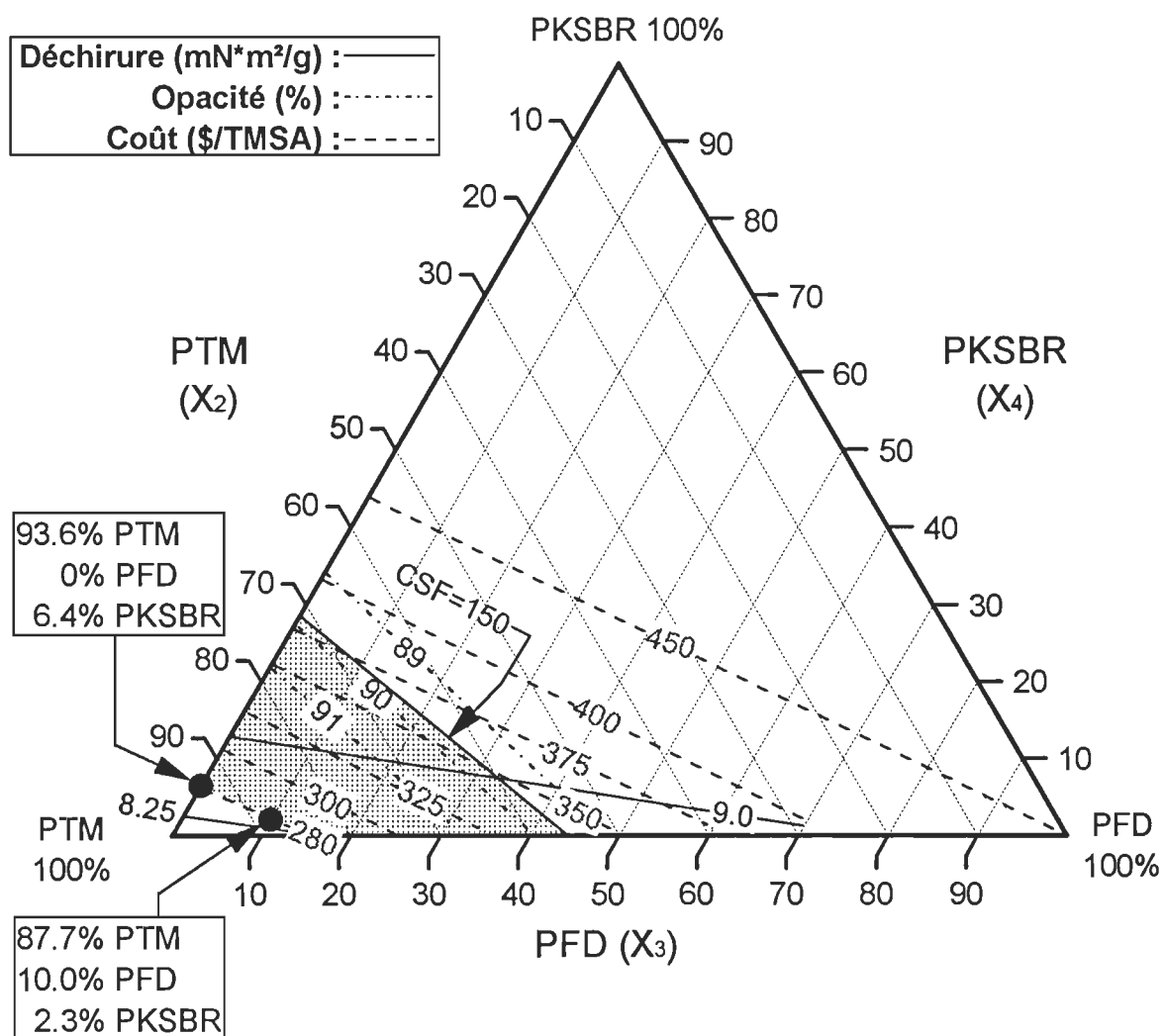


Fig. 4.2 : Premier graphique des résultats obtenus pour le cas n°3

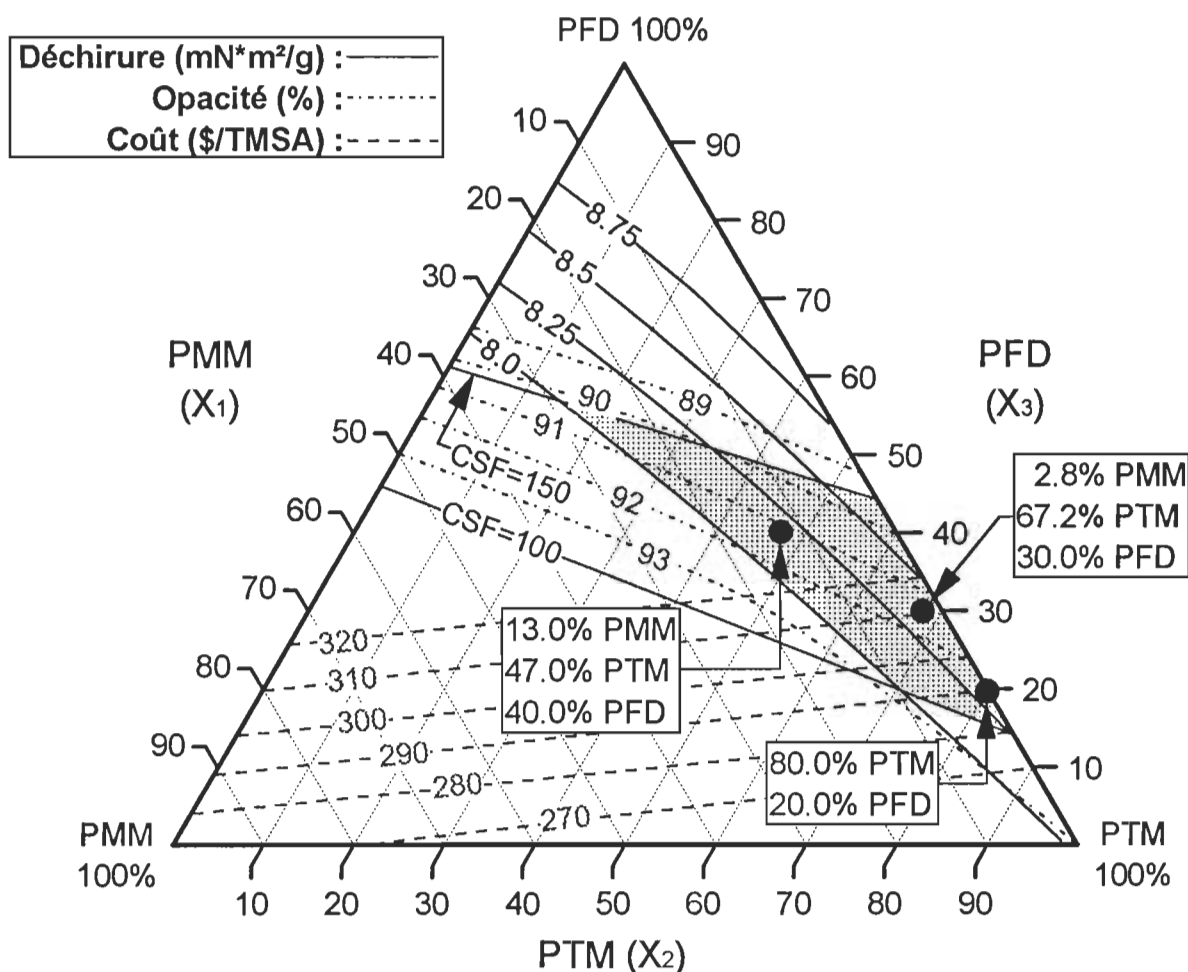


Fig. 4.3 : Deuxième graphique des résultats obtenus pour le cas n°3

4.5 Étude du cas n°4

Tel que mentionné au tableau 4.3, le 4^e cas porte sur les effets de la diminution du grammage sur le mélange optimal et sur ses propriétés. Il n'y a pas de conditions initiales spécifiques imposées à GAMS sauf évidemment le grammage. Nous avons donc effectué quatre essais avec les grammages suivants : 48, 46, 44 et 42 g/m². Le tableau 4.8 présente les résultats obtenus pour ces quatre essais.

Propriété	Grammage Z_1 (g/m ²)			
	48.0	46.0	44.0	42.0
PTM X_2 (%)	93.6	93.6	93.6	93.6
PKSBR X_3 (%)	6.4	6.4	6.4	6.4
Raffinage Z_2 (kWh/TMSA)	257	257	257	257
Indice d'égouttage (ml CSF)	100	100	100	100
Indice d'éclatement (kPa*m ² /g)	2.6	2.7	2.5	2.5
Indice de déchirure (mN*m ² /g)	8.6	8.7	8.3	8.1
Longueur de rupture (km)	4.6	4.6	4.4	4.3
TEA (g/cm)	29.5	28.3	24.8	22.4
Longueur de rupture humide (m)	300	303	285	276
TEA humide (g/cm)	4.0	3.9	3.5	3.2
Opacité (%)	92.6	92.2	90.8	89.7
Blancheur (%)	57.7	57.7	57.8	57.8
Coût global du mélange (\$/TMSA)	279	279	279	279

Tableau 4.8 : Résultats obtenus pour le cas n°4

La constatation la plus évidente est que la composition du mélange optimal est toujours la même soit 93.6% de PTM et 6.4% de PKSBR au taux de raffinage minimal. Les propriétés qui sont les plus affectées sont la déchirure et l'opacité qui ont presque atteint leur valeur minimale à un grammage de 42 g/m². Nous avons essayé d'obtenir un mélange optimal à un grammage de 40 g/m² mais GAMS n'a pas pu trouver de solution. C'est donc dire que le mélange optimal correspondant au grammage minimal qui rencontre toutes les spécifications se trouve quelque part entre 42 g/m² et 40 g/m².

À la figure 4.4, nous avons représenté les effets de la diminution du grammage sur la déchirure et l'opacité. Pour ne pas trop encombrer le graphique, nous avons seulement montré les courbes de niveau des normes minimales de la déchirure et de l'opacité soient respectivement $8.0 \text{ mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ et 89%. Pour chacune des propriétés, il y a ainsi quatre courbes de niveau correspondant à chacun des niveaux de grammage donnés. Par exemple, la courbe **8.0(42)** correspond à la déchirure de $8.0 \text{ mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ à un grammage de $42 \text{ g}/\text{m}^2$. La zone ombragée illustre la zone admissible pour un grammage de $42 \text{ g}/\text{m}^2$. On constate que la surface de la zone admissible commence à diminuer à partir d'un grammage de $44 \text{ g}/\text{m}^2$ (voir la ligne identifiée **89(44)**). C'est l'opacité qui détermine alors la limite supérieure de la zone.

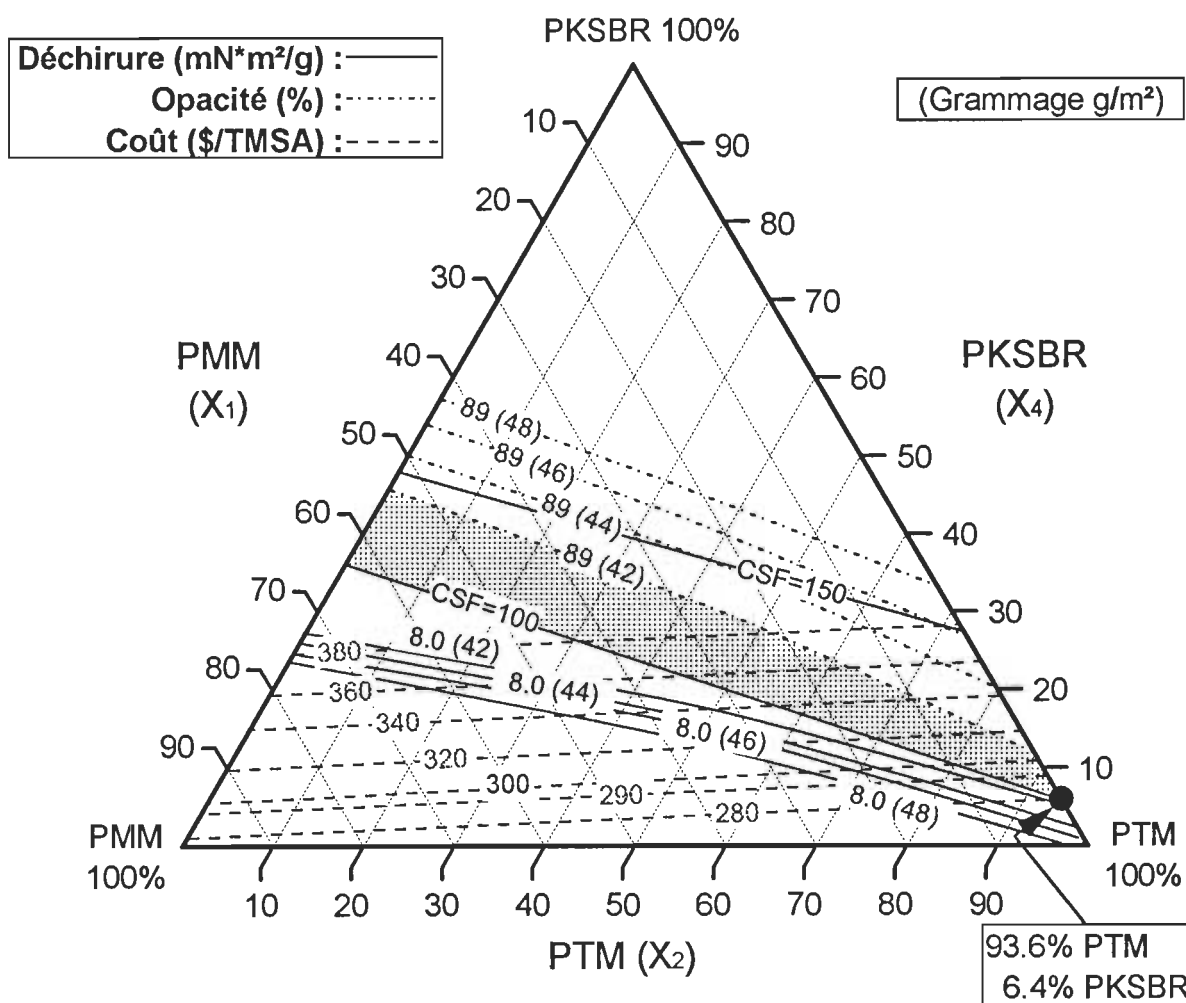


Fig. 4.4 : Graphique des résultats obtenus pour le cas n°4

4.6 Étude du cas n°5

Les principes de base du 5^e cas sont les mêmes que pour le cas précédent. La différence est l'évaluation des effets de la diminution du grammage tout en maximisant la proportion de PFD dans le mélange. Le tableau 4.9 présente les résultats obtenus pour ce 5^e cas.

Description	Grammage Z_1 (g/m ²)			
	48	46	44	42
PMM X_1 (%)	0	0	1.7	3.3
PTM X_2 (%)	76.6	77.4	76.2	73.7
PFD X_3 (%)	23.4	22.6	22.1	20.0
PKSBR X_4 (%)	0	0	0	3.1
Raffinage Z_2 (%)	-	-	-	257
Indice d'égouttage (ml CSF)	110	109	107	110
Indice d'éclatement (kPa*m ² /g)	2.5	2.4	2.4	2.4
Indice de déchirure (mN*m ² /g)	8.4	8.2	8.0	8.0
Longueur de rupture (km)	4.4	4.4	4.3	4.3
TEA (g/cm)	29.6	27.3	24.8	23.5
Longueur de rupture humide (m)	261	256	250	249
TEA humide (g/cm)	3.5	3.3	3.1	3.1
Opacité (%)	91.9	91.0	90.2	89.0
Blancheur (%)	58.5	58.4	58.4	58.4
Coût global du mélange (\$/TMSA)	297	295	295	305

Tableau 4.9 : Résultats obtenus pour le cas n°5

Ce qu'on peut remarquer de ces résultats est que GAMS a déterminé que le mélange optimal pour un grammage de 42 g/m² est de type quaternaire. C'est le seul mélange de ce type que GAMS nous a fourni tout au long de l'étude des 7 cas. Il faut mentionner que GAMS a eu beaucoup de difficultés à rencontrer les spécifications tout en essayant de maximiser la proportion de PFD dans le mélange. C'est pourquoi GAMS a introduit les 2 championnes dans son mélange optimal. En effet, on remarque qu'au grammage de 44 g/m², la déchirure avait déjà atteint son minimum tandis que l'opacité n'en était pas très éloignée non plus. GAMS a donc dû aller chercher ce qu'il lui manquait en terme de déchirure et d'opacité auprès des 2

championnes soient respectivement la PKSBR au taux de raffinage minimal et la PMM. Ceci a permis à GAMS de déterminer un mélange optimal dont les spécifications sont respectées et dont le coût est très raisonnable soit 305 \$/TMSA. Comme la représentation graphique d'un mélange quaternaire est très difficile à présenter et surtout très difficile à visualiser, nous avons choisi de ne représenter que le graphique des mélanges optimaux correspondant aux trois premiers grammages (figure 4.5).

La zone ombragée de la figure 4.5 correspond au grammage de 44 g/m². Un examen attentif de la figure permet de constater que les courbes de niveau de la déchirure et de l'opacité pour un grammage de 42 g/m² ne se croisent plus. Ceci indique qu'il n'est plus possible de trouver un mélange de pâtes PMM, PTM et PFD qui satisfait nos normes de qualité. C'est pourquoi GAMS a dû se tourner vers la PKSBR pour permettre aux courbes (ou surfaces dans ce cas-ci) de niveau de la déchirure et de l'opacité de se croiser à nouveau et ainsi définir une nouvelle zone admissible.

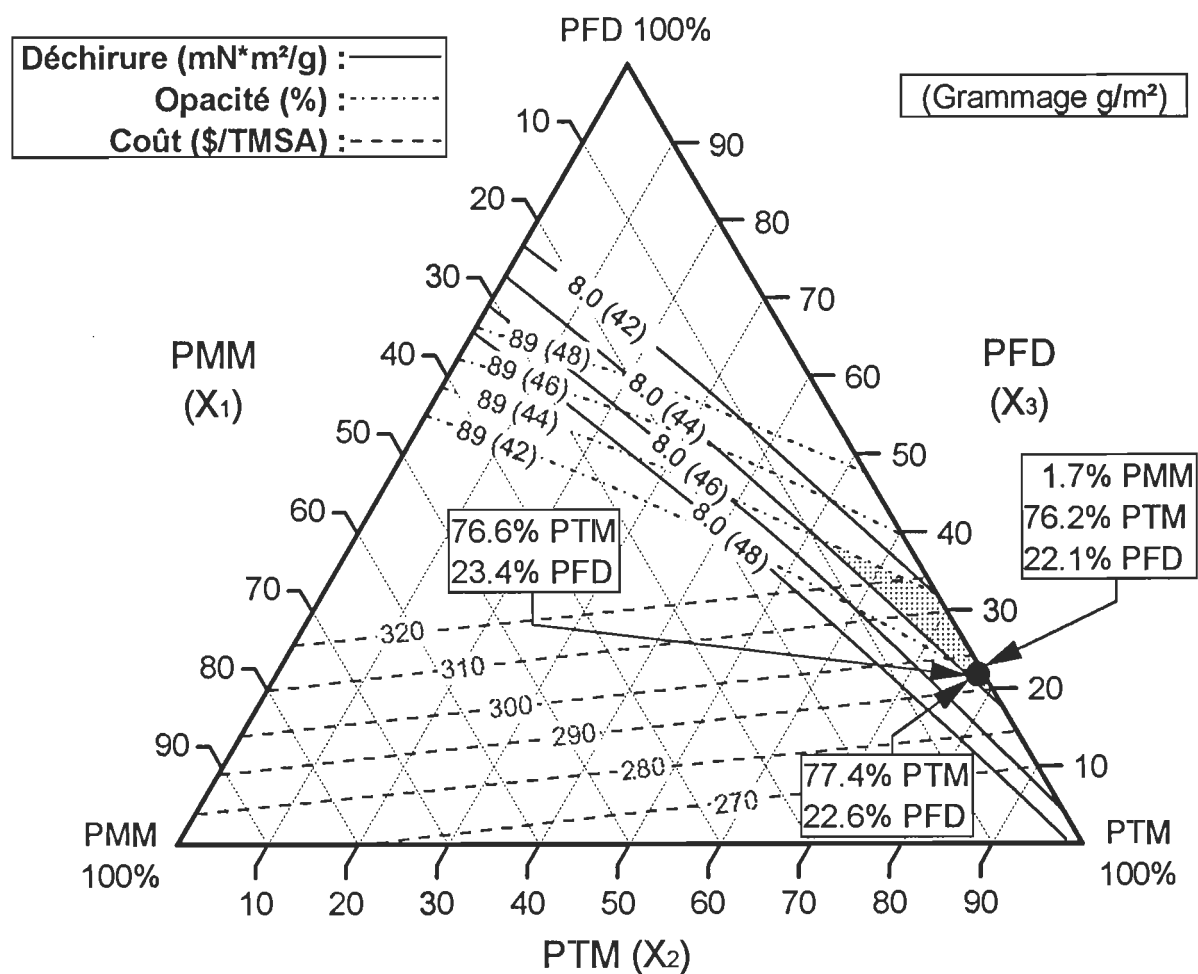


Fig. 4.5 : Graphique des résultats obtenus pour le cas n°5

4.7 Étude du cas n°6

Le but de l'étude du 6^e cas est d'évaluer les effets d'une variation dans le coût de la PFD. On sait que le coût de la PFD est directement dépendant de la demande pour les vieux journaux et les vieux magazines recyclés. Par exemple, le démarrage de plusieurs unités de désencrage au Canada a sûrement créé une forte demande pour le recyclage du vieux papier que ce soit tant du côté des États-Unis que celui

du Canada. On peut cependant imaginer que le prix de la tonne de vieux papiers va suivre le cycle économique *naturel* de l'industrie des pâtes et papiers.

C'est pourquoi, nous avons varié le coût de base de la PFD qui est actuellement d'environ 450 \$/TMSA de $\pm 20\%$. Le coût inférieur devient donc 350 \$/TMSA tandis que le coût supérieur devient 550 \$/TMSA. Le tableau 4.10 montre les résultats obtenus pour ce 6^e cas.

Du tableau 4.10, on constate que GAMS profite de la réduction du coût de la PFD soit 350 \$/TMSA pour rajouter 4% de PFD au mélange optimal. Il doit cependant introduire une très faible quantité de PMM pour garder l'opacité à peu près au même niveau que le mélange optimal à 450 \$/TMSA. On remarque aussi que les propriétés n'ont pas subi de changements significatifs. Le seul changement tangible se situe au niveau du coût global du mélange qui diminue d'environ 20 \$ la tonne.

Quant au coût de 550 \$/TMSA, les propriétés ne subissent pas non plus de changements très importants. Par rapport au coût de base, le mélange optimal reste un mélange de type binaire. GAMS a dû diminuer quelque peu la proportion de PFD dans le mélange pour passer de 23.4% à 19.9% soit une différence de 3.5%. Malgré ce changement, le coût global du mélange est passé de 296.8 à 309.8 \$/TMSA soit une augmentation de 13 \$/TMSA.

Description	Coût de la PFD (\$/TMSA)		
	350	450	550
PMM X_1 (%)	0.7	0	0
PTM X_2 (%)	71.8	76.6	80.1
PFD X_3 (%)	27.5	23.4	19.9
Grammage Z_1 (g/m ²)	48	48	48
Indice d'égouttage (ml CSF)	115	110	105
Indice d'éclatement (kPa*m ² /g)	2.5	2.5	2.5
Indice de déchirure (mN*m ² /g)	8.4	8.4	8.3
Longueur de rupture (km)	4.4	4.4	4.4
TEA (g/cm)	30.2	29.6	29.1
Longueur de rupture humide (m)	256	261	266
TEA humide (g/cm)	3.5	3.5	3.5
Opacité (%)	91.6	91.9	92.2
Blancheur (%)	58.8	58.5	58.2
Coût global du mélange (\$/TMSA)	278	297	310

Tableau 4.10 : Résultats obtenus pour le cas n°6

Pour illustrer ces résultats, nous avons utilisé trois graphiques (voir figures 4.6, 4.7 et 4.8) qui montrent les changements dans les courbes de niveau du coût global du mélange. Le premier graphique présente les résultats concernant le coût de la PFD de 350 \$/TMSA, le deuxième, les résultats pour le coût de base de 450 \$ et le troisième, les résultats pour un coût de 550 \$/TMSA. D'un graphique à l'autre, la zone ombragée indiquant la partie admissible du mélange optimal ne change pas.

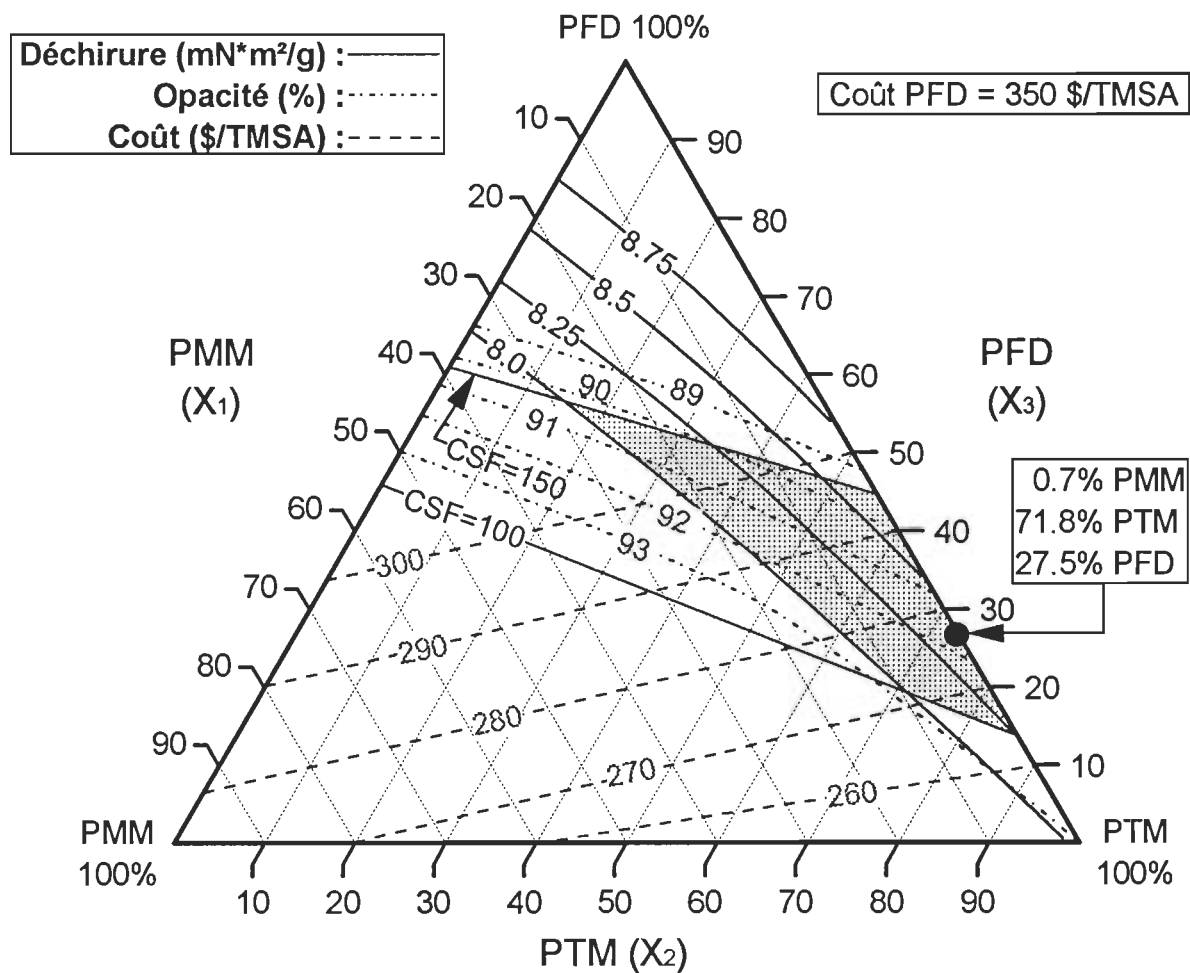


Fig. 4.6 : Premier graphique des résultats obtenus pour le cas n°6

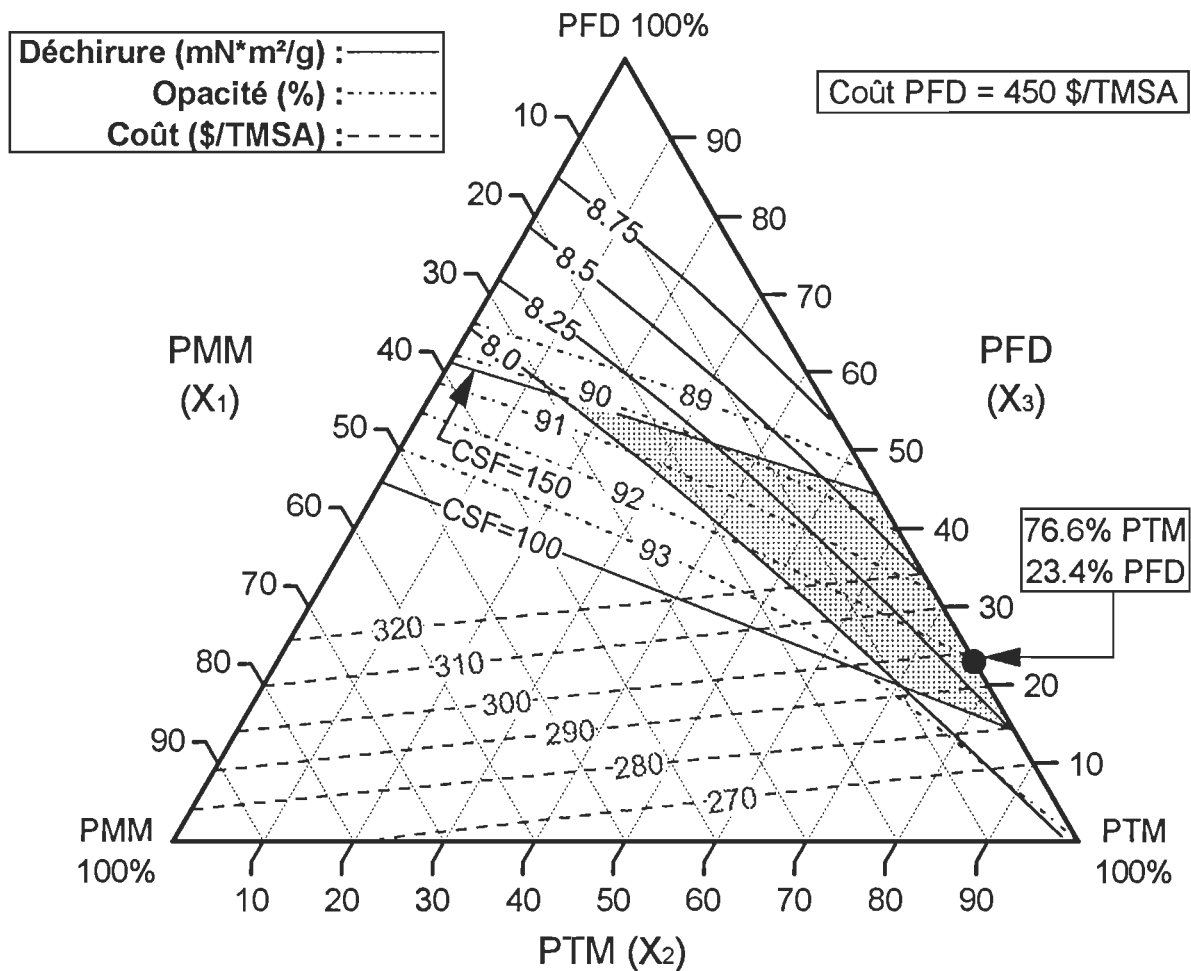


Fig. 4.7 : Deuxième graphique des résultats obtenus pour le cas n°6

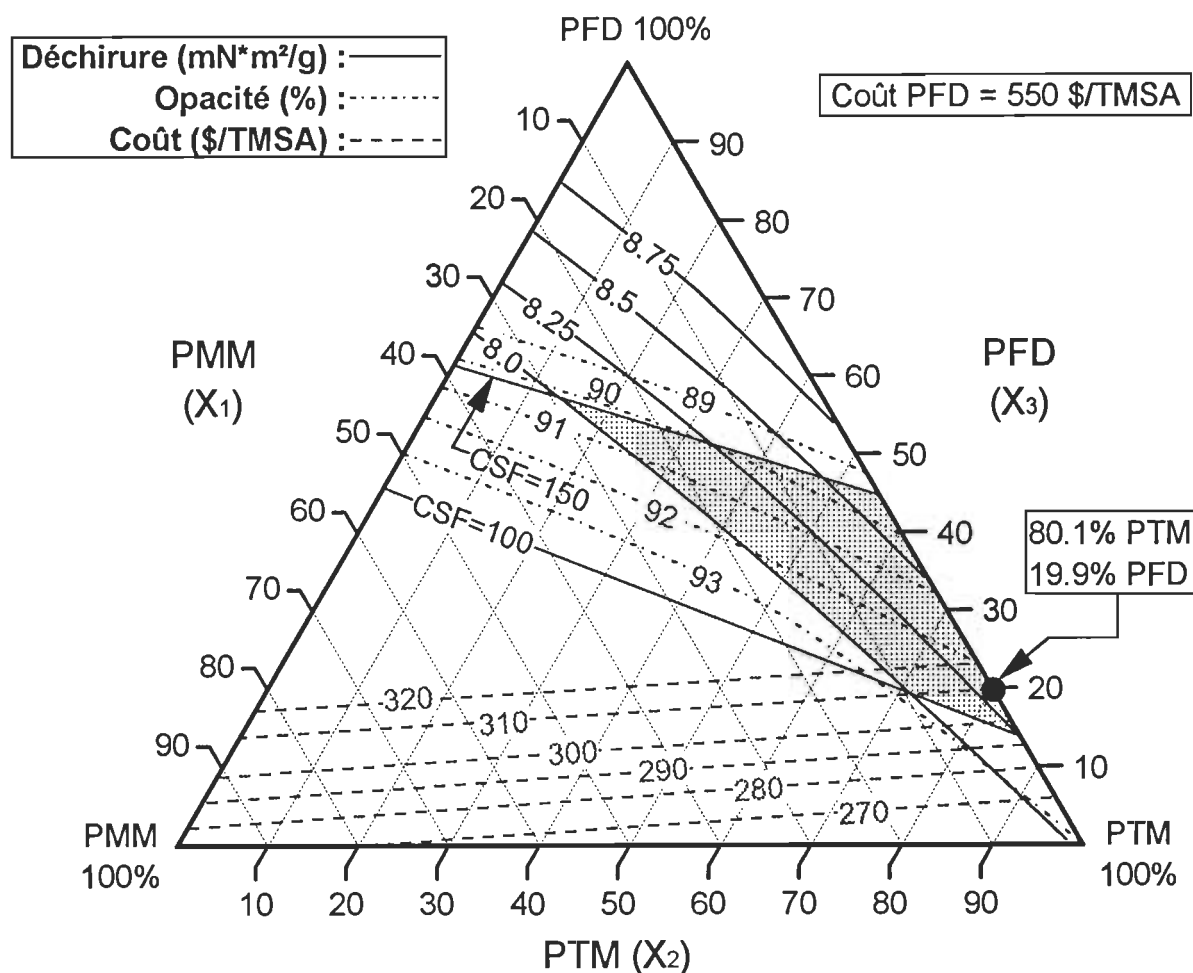


Fig. 4.8 : Troisième graphique des résultats obtenus pour le cas n°6

4.8 Étude du cas n°7

Le but de l'étude du 7^e cas est en principe le même que le cas n°6 sauf que maintenant, c'est le coût de la PKSBR qui varie. La variation est toujours d'environ $\pm 20\%$ du coût de base. L'étude porte donc sur les trois coûts suivants : 550, 700 et 850 \$/TMSA. Le tableau 4.11 présente les résultats obtenus pour le cas n°7 tandis

que les figures 4.9, 4.10 et 4.11 illustrent respectivement les résultats obtenus pour chacun des coûts de la PKSBR.

Description	Coût de la PKSBR (\$/TMSA)		
	550	700	850
PMM X_1 (%)	64.0	0	0
PTM X_2 (%)	0	93.6	93.6
PKSBR X_4 (%)	36.0	6.4	6.4
Raffinage Z_2 (kWh/TMSA)	257	257	257
Grammage Z_1 (g/m ²)	48	48	48
Indice d'égouttage (ml CSF)	100	100	100
Indice d'éclatement (kPa*m ² /g)	3.2	2.6	2.6
Indice de déchirure (mN*m ² /g)	9.4	8.6	8.6
Longueur de rupture (km)	5.2	4.5	4.5
TEA (g/cm)	50.5	29.5	29.5
Longueur de rupture humide (m)	344	300	300
TEA humide (g/cm)	6.3	4.0	4.0
Opacité (%)	94.5	92.6	92.6
Blancheur (%)	56.9	57.7	57.7
Coût global du mélange (\$/TMSA)	378	279	289

Tableau 4.11 : Résultats obtenus pour le cas n°7

Au tableau 4.11, on constate que le mélange optimal pour le coût de 550 \$/TMSA de la PKSBR est très différent des deux autres qui sont, quant à eux, identiques. En effet, le mélange optimal de ceux-ci est composé de 93.6% de PTM et 6.4% de PKSBR tandis que le mélange optimal de la première colonne est composé de 64.0% de PMM et de 36.0% de PKSBR toujours raffinée au taux de raffinage minimal. La question à se poser dans ce cas-ci, c'est pourquoi choisir un

mélange optimal dont le coût est d'environ 100 \$/TMSA supérieur au coût global du mélange correspondant au coût de 700 \$/TMSA de la PKSBR. La réponse se trouve au niveau de la fonction de désirabilité globale D . D'après le tableau 4.4, nous savons que le cas n°7 ne comprend pas la fonction de désirabilité individuelle de la PKSBR. La fonction D est donc composée des fonctions de désirabilité de la déchirure, de l'opacité et du coût. Le tableau 4.11 nous montre que la déchirure et l'opacité sont très élevées par rapport à tous les autres mélanges optimaux obtenus jusqu'à présent.

Lorsque la fonction de désirabilité d_4 de la PFD n'est pas incluse dans la fonction globale D , cette fonction devient :

$$D = \left[\left(\frac{\text{Déchirure} - 4.0}{9.0} \right) \left(\frac{\text{Opacité} - 55}{45} \right)^3 \left(\frac{750 - \text{Coût}}{500} \right) \right]^{0.2}$$

Par ailleurs, comme la zone admissible ne change pas d'un graphique à l'autre, nous avons préparé le tableau 4.12 pour vérifier les désirabilités globales obtenues pour six options. Les désirabilités ont été calculées à l'aide de l'équation ci-dessus. Les valeurs ombragées du tableau correspondent aux résultats obtenus au tableau 4.11. On constate que pour les coûts de 700 et de 850 \$/TMSA, le gain de déchirure et d'opacité n'est pas suffisant pour obtenir une désirabilité supérieure à celle qu'on obtient avec la combinaison des pâtes PTM et PKSBR comme pour le coût de 550 \$/TMSA. Pour éviter cette situation, il aurait fallu augmenter l'importance de la fonction de désirabilité du coût dans l'équation globale D . Par contre, en

changeant un paramètre de cette équation pour changer le résultat final, il faut modifier le nom qu'on donne à cette équation en l'appelant fonction *subjective* au lieu de fonction *objective*.

Description	Coût de la PKSBR (\$/TMSA)					
	550		700		850	
PMM (%)	64.0	0	64.0	0	64.0	0
PTM (%)	0	93.6	0	93.6	0	93.6
PKSBR (%)	36.0	6.4	36.0	6.4	36.0	6.4
Déchirure (mN*m ² /g)	9.4	8.6	9.4	8.6	9.4	8.6
Opacité (%)	94.5	92.6	94.5	92.6	94.5	92.6
Coût global (\$/TMSA)	378	270	432	279	486	289
Désirabilité globale	0.787	0.779	0.763	0.776	0.735	0.772

Tableau 4.12 : Désirabilité globale de plusieurs options pour le cas n°7

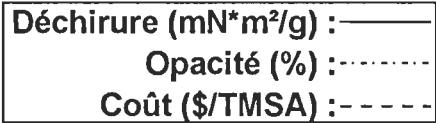
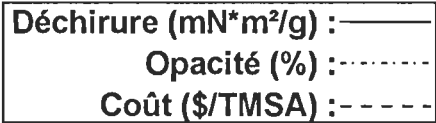


Fig. 4.10 : Deuxième graphique des résultats obtenus pour le cas n°7



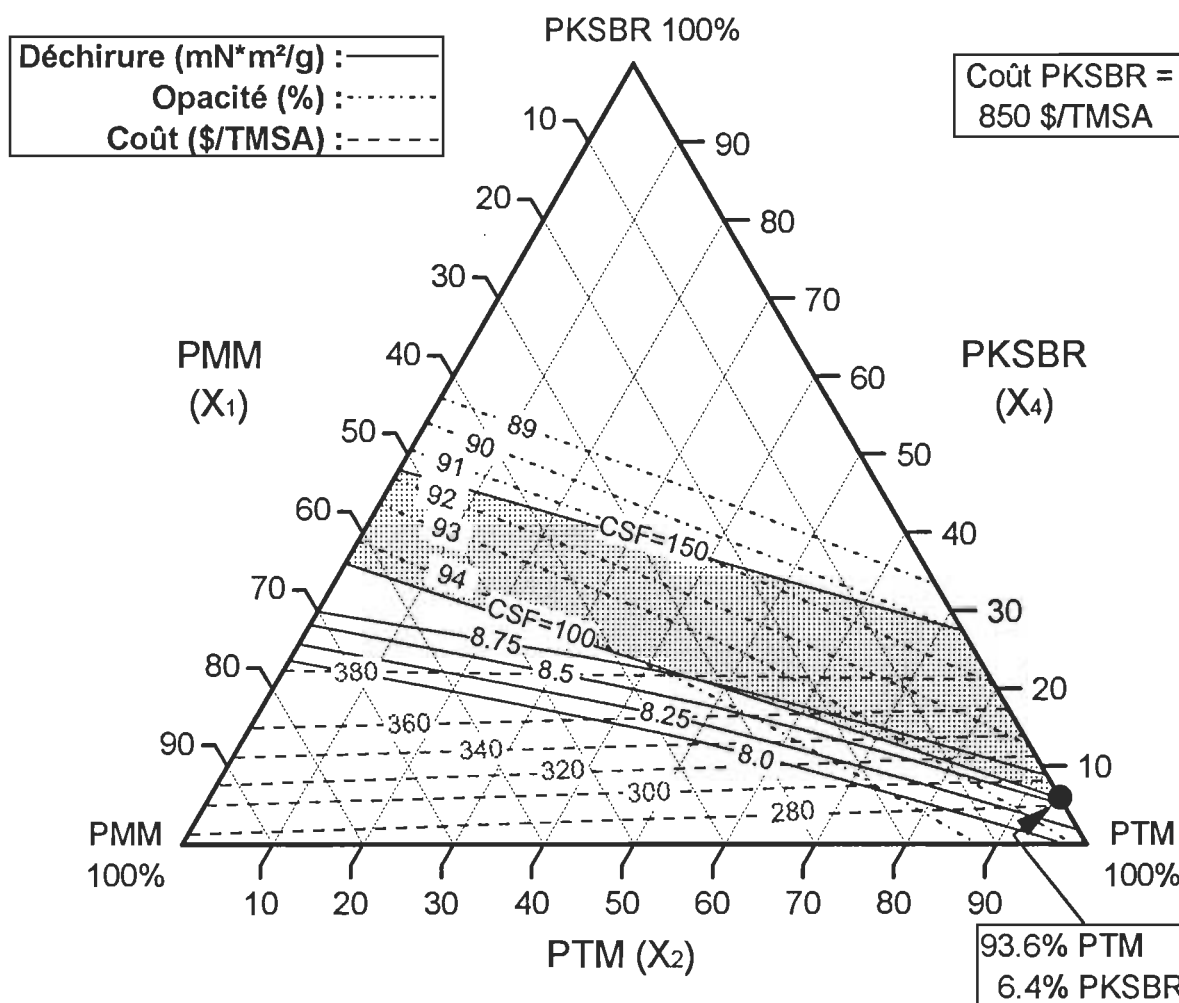


Fig. 4.11 : Troisième graphique des résultats obtenus pour le cas n°7

4.9 Bilan des résultats obtenus pour l'optimisation

Le tableau 4.13 présente la compilation des résultats obtenus pour les 7 cas d'optimisation étudiés au cours du chapitre 4. Ce tableau permet de constater que la PTM est la pâte qui possède les propriétés papetières les mieux équilibrées par rapport aux trois autres. En effet, elle se retrouve en forte proportion dans tous les mélanges sauf celui du cas n°7 où le coût de la PKSBR est de 550 \$/TMSA.

On peut aussi remarquer que le mélange qui maximise le mieux les propriétés papetières est celui où les deux championnes (PMM et PKSBR) sont réunies. Il faut cependant payer le prix pour obtenir ce mélange puisque son coût est de 100 \$/TMSA supérieur au coût du mélange de base pour le cas n°7.

Par ailleurs, si on oublie les résultats du mélange le plus dispendieux, on remarque que les valeurs de la plupart des propriétés comme la blancheur, l'indice d'éclatement et la longueur de rupture demeurent pratiquement inchangées pour l'ensemble des mélanges optimaux obtenus. Par contre, on peut voir que l'addition de PFD entraîne une diminution de la longueur de rupture humide. L'utilisation d'une forte proportion de PFD pour la fabrication du papier journal pourrait donc engendrer certains problèmes d'opération au bout humide de la machine à papier si celle-ci n'est pas équipée de sections de presses modernes. La diminution observée pour la longueur de rupture humide est aussi vraie pour les autres propriétés physiques du papier. En plus d'une augmentation du coût de production du mélange de pâtes, on a aussi une diminution des propriétés physiques.

	Cas n°1	Cas n°2	Cas n°3					Cas n°4				Cas n°5				Cas n°6			Cas n°7		
PMM (%)	0	0	0	0	0	2.8	13.0	0	0	0	0	0	0	1.7	3.3	0.7	0	0	64.0	0	0
PTM (%)	93.6	76.6	93.6	87.7	80.0	67.2	47.0	93.6	93.6	93.6	93.6	76.6	77.4	76.2	73.7	71.8	76.6	80.1	0	93.6	93.6
PFD (%)	0	23.4	0	10.0	20.0	30.0	40.0	0	0	0	0	23.4	22.6	22.1	20.0	27.5	23.4	19.9	0	0	0
PKSBR (%)	6.4	0	6.4	2.3	0	0	0	6.4	6.4	6.4	6.4	0	0	0	3.1	0	0	0	36.0	6.4	6.4
Raffinage (kWh/TMSA)	257	-	257	257	-	-	-	257	257	257	257	-	-	-	257	-	-	-	257	257	257
Grammage (g/m²)	48	48	48	48	48	48	48	48	46	44	42	48	46	44	42	48	48	48	48	48	48
Indice d'égouttage (ml CSF)	100	110	100	100	105	118	127	100	100	100	100	110	109	107	110	115	110	105	100	100	100
Indice d'éclatement (kPa*m²/g)	2.6	2.5	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.6	2.7	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.5	3.2	2.6	2.6
Indice de déchirure (mN*m²/g)	8.6	8.4	8.6	8.4	8.3	8.4	8.2	8.6	8.7	8.3	8.1	8.4	8.2	8.0	8.0	8.4	8.4	8.3	9.4	8.6	8.6
Longueur de rupture (km)	4.5	4.4	4.5	4.4	4.4	4.4	4.4	4.6	4.6	4.4	4.3	4.4	4.4	4.3	4.3	4.4	4.4	4.4	5.2	4.5	4.5
TEA (g/cm)	29.5	29.6	29.5	28.9	29.2	30.3	30.8	29.5	28.3	24.8	22.4	29.6	27.3	24.8	23.5	30.2	29.6	29.1	50.5	29.5	29.5
Longueur de rupture humide (m)	300	262	300	282	266	253	242	300	303	285	276	261	256	250	249	256	261	266	344	300	300
TEA humide (g/cm)	4.0	3.5	4.0	3.7	3.5	3.6	3.6	4.0	3.9	3.5	3.2	3.5	3.3	3.1	3.1	3.5	3.5	3.5	6.3	4.0	4.0
Opacité (%)	92.6	91.9	92.6	92.6	92.2	91.6	91.3	92.6	92.2	90.8	89.7	91.9	91.0	90.2	89.0	91.6	91.9	92.2	94.5	92.6	92.6
Blancheur (%)	57.7	58.5	57.7	57.9	58.2	59.0	60.0	57.7	57.7	57.8	57.8	58.5	58.4	58.4	58.4	58.8	58.5	58.2	56.9	57.7	57.7
Coût global du mélange (\$/TMSA)	279	297	279	281	290	311	333	279	279	279	279	297	295	295	305	278	297	310	378	279	289

Tableau 4.13 : Compilation des résultats obtenus pour les 7 cas d'optimisation

CONCLUSIONS

Les résultats obtenus dans ce travail permettent de conclure que l'introduction de PFD dans un mélange pour papier journal n'apporte aucun bénéfice tant du point de vue du coût que de celui des propriétés papetières. L'addition de PFD devient à notre avis une contrainte supplémentaire pour les producteurs de papier journal. L'étape de l'optimisation nous a aussi démontré qu'il a été nécessaire de forcer le logiciel GAMS à incorporer de la PFD à son mélange optimal. Il faut mentionner que les résultats de notre étude dépendent en grande partie des propriétés initiales de la PFD utilisée. Le pourcentage de vieux magazines dans la composition de la PFD est l'un des facteurs les plus importants. Il est donc possible que l'utilisation d'une PFD de composition différente à la nôtre donne des résultats différents.

Ce travail a aussi permis de démontrer la qualité et l'importance de la PTM. Cette pâte permet, en effet, d'obtenir un papier journal possédant de très bonnes propriétés papetières très bien équilibrées dont le coût de production est inférieur à tous les autres mélanges optimaux obtenus parce que la grande qualité de la PTM permet de fabriquer du papier journal avec des proportions de PTM dans le mélange pouvant représenter jusqu'à 100% et que le coût de production de la PTM est inférieur aux autres pâtes de qualité disponibles. Par contre, GAMS a aussi évalué

que la PMM a toujours une petite place réservée surtout si on veut diminuer le grammage du papier tout en maximisant la proportion de PFD du mélange.

Tout au long de ce travail, nous avons mentionné que la PMM est la championne en ce qui concerne l'opacité. À la lumière des résultats obtenus, nous devons maintenant parler d'une autre pâte championne. Cette pâte est la PTM car elle allie harmonieusement les propriétés physiques et les propriétés optiques. On comprend à présent le développement très important de la famille des PTM et PCTM effectué à partir des années 70.

En ce qui concerne la différence entre la PMM et la PTM, le cas n°7 de l'étape de l'optimisation a démontré que la performance d'un mélange qui a longtemps été populaire n'était pas le fruit du hasard. Ce mélange est celui de la PMM et de la PKSBR. Même si celui-ci est le plus dispendieux de tous les mélanges optimaux obtenus, c'est aussi celui où les propriétés papetières sont les plus élevées. Ce mélange démontre le grand pouvoir opacifiant de la PMM qui s'impose sur les autres pâtes. Le mélange PMM-PKSBR confirme la théorie voulant que plus une pâte possède une propriété supérieure aux autres pâtes, plus cette propriété s'impose dans un mélange. Prenons l'opacité et la déchirure du mélange PMM-PKSBR. Pour une relation purement linéaire, on aurait :

$$\left[(97.6)_{Opacité} * (0.64)_{Proportion} \right]_{PMM} + \left[(68.6)_{Opacité} * (0.36)_{Proportion} \right]_{PKSBR} = 87.2\%$$

$$\left[(4.6)_{Déchirure} * (0.64)_{Proportion} \right]_{PMM} + \left[(11.9)_{Déchirure} * (0.36)_{Proportion} \right]_{PKSBR} = 7.2 \text{ mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$$

Les valeurs réelles pour l'opacité et la déchirure sont respectivement 94.6% et 9.4 mN*m²/g. Ces deux exemples montrent bien que la relation d'additivité pour l'opacité et la déchirure est loin d'être linéaire.

La méthode statistique utilisée pour réaliser ce travail a permis de rencontrer tous nos objectifs. Le plan expérimental élaboré au tout début de ce projet a permis de structurer notre démarche expérimentale tout en assurant que toutes les possibilités voulues seraient traitées. À partir des résultats expérimentaux et avec l'aide d'un programme appelé SAS, nous avons développé des modèles de régression pour chacune des propriétés papetières étudiées. Les facteurs principaux des propriétés ont pu être déterminés suite à l'analyse des modèles de régression. Il est donc possible de prédire le comportement des mélanges en travaillant avec les facteurs principaux. Le plus grand bienfait de la détermination des modèles de régression est la possibilité d'effectuer de l'optimisation à l'aide d'un logiciel approprié. Il est aussi possible, si le problème n'est pas trop compliqué, d'effectuer le travail d'optimisation en utilisant une méthode graphique. Pour l'optimisation de mélanges de type ternaire particulièrement, l'utilisation de graphiques triangulaires tels que montrés au chapitre IV est inévitable.

La détermination des modèles de régression a démontré que la plupart des propriétés papetières sont influencées par des facteurs autres que linéaires. C'est

particulièrement le cas pour les propriétés optiques. Il faut cependant préciser que l'ensemble des modèles linéaires des propriétés auraient pu être suffisant pour expliquer 95% et plus de la variance totale. À l'exception de la longueur de rupture, nous avons dû opter pour un modèle de régression de type quadratique en raison du manque d'ajustement des modèles de régression de type linéaire. C'est la méthode que nous avons décidée de suivre au départ et nous l'avons suivie pour tous les modèles de régression.

Une autre conclusion auquel nous sommes arrivés est la question du raffinage de la PKSBR. La PKSBR contenue dans les mélanges optimaux est raffinée au taux de raffinage minimal. Ceci indique que la fonction fondamentale de la PKSBR est l'augmentation substantielle de la propriété de l'indice de déchirure du mélange. Si on n'avait pas inclus le taux de raffinage (Z_2) dans notre plan expérimental, celui-ci aurait été beaucoup plus simple. En effet, le retranchement d'une variable de procédé entraîne une diminution de 64 points de notre plan expérimental initial. Le nombre total de points expérimentaux serait donc passé de 144 à 80.

En ce qui concerne maintenant le grammage des formettes (Z_1), il faut mentionner que cette variable n'a pas été incluse directement dans l'étape de l'optimisation, i.e. que nous n'avons pas incorporé une fonction de désirabilité individuelle pour le grammage dans la fonction de désirabilité globale. Nous avons plutôt opter pour une analyse avec plusieurs niveaux donnés de grammage (cas n°4

et n°5). Cette façon de procéder nous a quand même permis de déterminer que le grammage minimal auquel nos normes de qualité du papier nous permettent d'aller est 42 g/m².

L'analyse du modèle de régression de l'opacité a permis de déterminer que l'influence des termes quadratiques reliés au grammage n'est pas très élevée. En fait, l'ensemble des termes quadratiques du modèle de l'opacité permettent surtout de diminuer le manque d'ajustement du modèle de régression. En effet, le modèle linéaire expliquait déjà 99% de la variance totale de l'opacité.

Les cas qui auraient pu être traités au chapitre IV sont très nombreux, nous avons traité seulement quelques uns d'entre eux. Ce travail est présenté de façon à permettre l'analyse de d'autres cas si tel besoin il y a.

ANNEXE A

DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE DU PAPIER À L'ÉTAT HUMIDE

1. Formation

La méthode consiste à préparer 4 formettes de 1.2 g chacune suivant la méthode standard ACPP C.4 en déposant au préalable sur la toile de formation un gabarit en acier inoxydable produisant 3 bandes de 127 x 25.4 mm. Les formettes ainsi formées sont conservées sous une pellicule de plastique pour éviter l'assèchement pendant la production des autres formettes.

2. Pressage

Les formettes sont ainsi accumulées pour 4 à 5 pâtes différentes. Une formette de chacune de ces pâtes ne sera pas pressée; une sera pressée à 172 kPa (25 psig); une à 345 kPa (50 psig) et la dernière de chacune des séries à 517 kPa (75 psig). Chacun de ces pressages dure 2 minutes et est effectué sur une presse à formettes standard. Les formettes sont empilées sur la presse de la façon

suivante: un buvard sec, le buvard humide avec les bandes, une pellicule de plastique pour éviter que les bandes adhèrent à la plaque et une plaque d'acier inoxydable polie. Le cycle est répété pour toutes les pâtes.

Après le pressage, le buvard supportant les 3 bandes est entreposé dans un contenant en plastique de 330 x 230 x 6.5 mm. Toutes les formettes (bandes) correspondant à un même pressage sont gardées dans un même contenant sur lequel on note la pression utilisée. Les formettes non-pressées (0 kPa) sont aussi enfermées dans un contenant pour éviter le séchage.

3. Essai de traction sur les bandes humides

Les bandes sont testées une à la fois sur un tensiomètre Instron en utilisant les mâchoires de 25.4 mm, distantes de 100 mm et la cellule de 5 kg. Un carré de buvard sec est utilisé à chaque extrémité de la bande pour assécher la bande et éviter qu'elle ne se rompe dans la mâchoire. La partie entre les mâchoires est coupée à l'aide d'un scalpel après la rupture et déposée dans un flacon pré-pesé. Les 3 bandes sont déposées dans un même flacon; les flacons sont pesés avec leur contenu puis séchés et pesés à nouveau pour déterminer l'humidité des bandes à chacun des 4 niveaux de pressage.

4. Résultats

La longueur de rupture, l'allongement et l'énergie absorbée à la rupture (TEA) sont reportés en fonction de l'humidité sur un graphique. La valeur interpolée pour une humidité de 30% pour chaque propriété est reportée comme valeur finale.

5. Commentaires

Les bandes ne doivent pas être trop longtemps en contact avec l'air pour éviter qu'elles ne sèchent. Pour la même raison, les essais de traction doivent avoir lieu le plus rapidement possible après la production des bandes.

ANNEXE B

DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES DE RÉGRESSION DE BASE

Les modèles de régression pour les plans expérimentaux composés de sous-plans de types différents doivent être développés d'une façon particulière. C'est le cas pour notre plan expérimental composé à la base d'un plan composite centré (CCD) à 2 variables sur lequel on a placé un tétraèdre sur chacun de ces 9 points expérimentaux (voir chapitre 2).

La difficulté principale de ces plans expérimentaux découle du fait que chaque tétraèdre (ou design de mélanges), correspond à un niveau de chaque variable (Z_1 et Z_2) du CCD.

Les formes canoniques générales des modèles de mélanges sont :

Linéaire :
$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i X_i$$

Quadratique :
$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i X_i + \sum_{i < j} \sum_{j=2}^q \beta_{ij} X_i X_j$$

Cubique complet :
$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i X_i + \sum_{i < j} \sum_{j=2}^q \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i < j} \sum_{j=2}^q \delta_{ij} X_i X_j (X_i - X_j) + \sum_{i < j} \sum_{j < k} \sum_{k=3}^q \beta_{ijk} X_i X_j X_k$$

Cubique spéciale :
$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i X_i + \sum_{i < j} \sum_{j=2}^q \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i < j} \sum_{j < k} \sum_{k=3}^q \beta_{ijk} X_i X_j X_k$$

où η représente la propriété à modéliser et q représente le nombre de composants dans le mélange soient 4 (X_1, X_2, X_3, X_4) dans notre cas. Il est à remarquer que l'arrangement des indices i, j et k fait en sorte qu'on ne pourra pas obtenir des termes comme X_1^2 et X_2^3 . La raison de l'absence de ces termes des équations provient de la nécessité de découpler les 4 composants des mélanges. En effet, si on gardait ces termes ainsi que des termes constants (voir chapitre II) dans nos équations, nous aurions alors 33% de corrélation entre les facteurs principaux (composants purs) et nous ne pourrions pas effectuer la modélisation en utilisant les 4 composants à la fois.

Les termes de ces quatre modèles polynomiaux canoniques sont faciles à interpréter. Géométriquement, le paramètre β_i constitue la réponse associée à un mélange pur ($X_i = 1, X_j = 0, j \neq i$). C'est pourquoi la portion $\sum_{i=1}^q \beta_i X_i$ de chacun des modèles est appelée *portion de mélange linéaire* et, donc, si le mélange des

composants est strictement additif alors la forme canonique linéaire est une représentation adéquate de la surface de réponse.

ANNEXE C

EXEMPLE D'UN FICHIER DE DONNÉES (.GMS) POUR GAMS

\$TITLE OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES

VARIABLES X1 Pate mecanique de meules (PMM)
 X2 Pate thermomecanique (PTM)
 X3 Pate de fibres desencrees (PFD)
 X4 Pate kraft semi-blanchie de resineux (PKSBR)
 Z2 Raffinage de la PKSBR (valeur codee)
 RAFF Raffinage de la PKSBR (valeur non-codee)
 CSF Indice d'egouttage
 ECLAT Indice d'eclatement
 LR Longueur de rupture
 BLANC Blancheur
 DECH Indice de déchirure
 OPAC Opacite
 DDECH Desirabilite de la déchirure
 DOPAC Desirabilite de l'opacite
 COUT Cout du melange optimal
 DCOUT Desirabilite du cout
 DPDF Desirabilite de la PFD
 DESG Desirabilite globale;

POSITIVE VARIABLE X1 X2 X3 X4;

SCALAR DIFZ1 Moitie de la difference de Z1 / 8.5 /
 MOYZ1 Moyenne de Z1 / 48.0 /
 DIFZ2 Moitie de la difference de Z2 / 244.0 /
 MOYZ2 Moyenne de Z2 / 601.0 /
 CPMM Cout de la PMM / 275.0 /
 CPTM Cout de la PTM / 250.0 /
 CPFD Cout de la PFD / 450.0 /
 CPKSBR Cout de la PKSBR / 700.0 /
 CKWH Cout de l'electricite / 0.04 /
 GRAM Grammage (valeur non-codee) / 48.0 /
 Z1 Grammage (valeur codee) / 0.0 /;

EQUATIONS LOIMEL Somme des fractions doit etre egale a 1.0
 FRAFF Decodage de Z2
 FCSF Modele de l'indice d'egouttage
 CCSFB Contrainte de l'indice d'egouttage (limite basse)
 CCSFH Contrainte de l'indice d'egouttage (limite haute)
 FECLAT Modele de l'indice d'eclatement
 CECLAT Contrainte pour l'indice d'eclatement
 FLR Modele de la longueur de rupture
 CLR Contrainte de la longueur de rupture
 FBLANC Modele de la blancheur
 CBLANC Contrainte de la blancheur

```

FDECH  Modele de la déchirure
CDECH  Contrainte de la déchirure
FDDECH Fonction de desirabilite de la déchirure
FOPAC  Modele de l'opacite
COPAC  Contrainte de l'opacite
FDOPAC Fonction de desirabilite de l'opacite
FCOUT  Cout du melange
FDCOUT Fonction de desirabilite du cout
CX1    Contrainte pour la PMM
CX2    Contrainte pour la PTM
CX3    Contrainte pour la PFD
CX4    Contrainte pour la PKSBR
FDPFD  Fonction de desirabilite de la PFD
FDESG  Fonction de desirabilite globale;

LOIMEL.. X1 + X2 + X3 + X4                      =E= 1.0;
FRAFF..  DIFZ2*Z2 + MOYZ2                      =E= RAFF;
FCSF..   42.6832*X1 + 90.9691*X2 + 357.4776*X3 + 371.1982*X4 -
117.1748*X4*Z2 - 12.0946*X4*Z2*Z2 - 353.8323*X1*X3 -
291.0878*X1*X4 - 243.1216*X2*X3 - 150.5993*X2*X4 +
137.7033*X1*X4*Z2 + 105.6444*X2*X4*Z2          =E= CSF;
CCSFB..  CSF                                  =G= 100.0;
CCSFH..  CSF                                  =L= 150.0;
FECLAT.. (88.8645*X1 + 114.6775*X2 + 132.2018*X3 + 341.2898*X4 +
20.3578*X1*Z1 + 28.1611*X2*Z1 + 26.9238*X3*Z1 +
72.0707*X4*Z1 + 27.3410*X4*Z2 + 5.3003*X4*Z1*Z2 -
5.5911*X4*Z2*Z2 - 67.0988*X1*X4 - 26.2319*X1*X4*Z1 -
29.2478*X1*X4*Z2) / GRAM                      =E= ECLAT;
CECLAT.. ECLAT                              =G= 1.6;
FLR..    (181.1874*X1 + 207.6022*X2 + 224.5524*X3 + 410.1453*X4 +
41.4807*X1*Z1 + 48.9593*X2*Z1 + 42.5333*X3*Z1 +
81.2970*X4*Z1 + 24.8735*X4*Z2) / GRAM          =E= LR;
CLR..    LR                                  =G= 3.2;
FBLANC.. 56.3752*X1 + 57.9324*X2 + 76.3945*X3 + 70.6751*X4 +
2.8165*X1*X2 - 24.8425*X1*X3 - 23.1062*X1*X4 -
21.2005*X2*X3 - 22.1678*X2*X4 - 1.7262*X1*X3*Z1 -
2.1905*X2*X4*Z1 - 2.0230*X1*X4*Z2 + 2.4539*X2*X4*Z2*Z2 =E= BLANC;
CBLANC.. BLANC                              =G= 55.0;
FDECH..  (224.1334*X1 + 387.9186*X2 + 446.1279*X3 + 538.6842*X4 +
54.9188*X1*Z1 + 95.7684*X2*Z1 + 110.1772*X3*Z1 +
120.3792*X4*Z1 - 35.5910*X4*Z2 + 58.1672*X1*X3 +
407.4886*X1*X4 + 167.1274*X2*X4 + 184.7998*X3*X4 +
100.8965*X1*X4*Z1 + 58.1739*X2*X4*Z1 + 63.5746*X3*X4*Z1 +
46.4986*X3*X4*Z2 + 55.4865*X2*X4*Z1*Z1) / GRAM =E= DECH;
CDECH..  DECH                              =G= 8.0;
FDDECH.. (DECH - 4.0) / (13.0 - 4.0)          =E= DDECH;
FOPAC..  97.5361*X1 + 93.0983*X2 + 76.7002*X3 + 66.6083*X4 +
1.6171*X1*Z1 + 3.4081*X2*Z1 + 5.5388*X3*Z1 + 4.7144*X4*Z1 -
1.7626*X4*Z2 + 0.4843*X4*Z1*Z2 - 0.5951*X1*Z1*Z1 -
0.7141*X2*Z1*Z1 - 0.7787*X3*Z1*Z1 - 0.6715*X4*Z1*Z1 +
3.1067*X1*X2 + 24.1031*X1*X3 + 34.6267*X1*X4 + 14.8490*X2*X3 +
21.5188*X2*X4 + 5.9508*X3*X4 + 4.6621*X1*X4*Z1 +
3.7195*X2*X4*Z1 + 2.2931*X1*X4*Z2 + 2.3897*X2*X4*Z2 +
1.7596*X3*X4*Z2 - 2.3124*X1*X4*Z1*Z1          =E= OPAC;
COPAC..  OPAC                              =G= 89.0;
FDOPAC.. (OPAC - 55.0) / (100 - 55.0)         =E= DOPAC;
FCOUT..  CPMX*X1 + CPTM*X2 + CFPD*X3 + (CPKSBR + RAFF*CKWH)*X4 =E= COUT;
FDCOUT.. (750.0 - COUT) / (750.0 - 250.0)     =E= DCOUT;
CX1..    X1                                  =L= 1.0;
CX2..    X2                                  =L= 1.0;
CX3..    X3                                  =L= 0.4;
CX4..    X4                                  =L= 1.0;
FDPFD..  (X3 + 0.0001) / 0.4                 =E= DPFD;
FDESG..  (DOPAC**3 * DDECH * DCOUT)**0.2      =E= DESG;
* FDESG.. (DOPAC**3 * DDECH * DCOUT * DPFD**0.2 )**0.192 =E= DESG;

```

MODEL OPTIMISE /ALL/ ;

X1.LO = 0.0; X2.LO = 0.0; X3.LO = 0.0; X4.LO = 0.0;
 X1.UP = 1.0; X2.UP = 1.0; X3.UP = 1.0; X4.UP = 1.0;
 Z2.LO = -1.41;
 Z2.UP = 1.41;
 DECH.LO = 4.0; COUT.UP = 750.0; OPAC.LO = 55.0;

SOLVE OPTIMISE USING NLP MAXIMIZING DESG;

PARAMETER TEA Energie absorbee a la rupture;

TEA = 16.2853*X1.L + 26.2636*X2.L + 40.7192*X3.L + 93.5016*X4.L +
 4.5598*X1.L*Z1 + 8.9031*X2.L*Z1 + 12.0708*X3.L*Z1 +
 25.6840*X4.L*Z1 + 11.6504*X4.L*Z2.L + 15.0676*X4.L*Z1*Z1 +
 19.9949*X1.L*X4.L*Z1 - 38.0802*X1.L*X4.L*Z2.L -
 16.9412*X1.L*X4.L*Z1*Z1 - 18.5109*X2.L*X4.L*Z1*Z1;

PARAMETER LR30 Longueur de rupture humide 30% ;

LR30 = (13027.35*X1.L + 14066.38*X2.L + 7589.44*X3.L + 15338.87*X4.L +
 3481.17*X1.L*Z1 + 3918.42*X2.L*Z1 + 2126.35*X3.L*Z1 + 3624.73*X4.L*Z1 +
 2636.37*X4.L*Z2.L + 1026.81*X4.L*Z1*Z2.L + 4940.80*X1.L*X3.L +
 14110.32*X1.L*X4.L + 8130.71*X2.L*X4.L - 2754.39*X1.L*X2.L*Z1 +
 3992.44*X1.L*X4.L*Z1 + 2474.74*X2.L*X4.L*Z1 -
 2242.61*X1.L*X4.L*Z2.L) / GRAM;

PARAMETER TEA30 Energie absorbee a la rupture humide 30% ;

TEA30 = 3.6442*X1.L + 3.3614*X2.L + 2.7844*X3.L + 7.0828*X4.L +
 0.9636*X1.L*Z1 + 1.0160*X2.L*Z1 + 0.8957*X3.L*Z1 + 1.9088*X4.L*Z1 +
 2.3535*X4.L*Z2.L + 0.8857*X4.L*Z1*Z2.L + 0.2955*X4.L*Z2.L*Z2.L +
 2.6639*X1.L*X3.L + 7.8455*X1.L*X4.L + 1.7038*X2.L*X3.L +
 6.6942*X2.L*X4.L + 1.2921*X1.L*X3.L*Z1 + 1.7031*X1.L*X4.L*Z1 +
 2.2295*X2.L*X4.L*Z1 - 1.7670*X1.L*X4.L*Z2.L - 1.9289*X2.L*X4.L*Z2.L -
 2.2286*X3.L*X4.L*Z2.L - 0.8814*X3.L*X4.L*Z2.L*Z2.L;

DISPLAY X1.L, X2.L, X3.L, X4.L, Z1, GRAM, Z2.L, RAFF.L,
 CSF.L, ECLAT.L, DECH.L, LR.L, TEA, LR30, TEA30, OPAC.L, BLANC.L,
 COUT.L, DESG.L;

ANNEXE D

EXEMPLE D'UN FICHIER DE RÉSULTATS (.LST) POUR GAMS

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:23 PAGE 1
OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES

```

2
3 VARIABLES X1 PATE MECANIQUE DE MEULES (PMM)
4 X2 PATE THERMOMECHANIQUE (PTM)
5 X3 PATE DE FIBRES DESENCREES (PFD)
6 X4 PATE KRAFT SEMI-BLANCHIE DE RESINEUX (PKSBR)
7 Z2 RAFFINAGE DE LA PKSBR (VALEUR CODEE)
8 RAFF RAFFINAGE DE LA PKSBR (VALEUR NON-CODEE)
9 CSF INDICE D'EGOUTTAGE
10 ECLAT INDICE D'ECLATEMENT
11 LR LONGUEUR DE RUPTURE
12 BLANC BLANCHEUR
13 DECH INDICE DE DECHIRURE
14 OPAC OPACITE
15 DDECH DESIRABILITE DE LA DECHIRURE
16 DOPAC DESIRABILITE DE L'OPACITE
17 COUT COUT DU MELANGE OPTIMAL
18 DCOUT DESIRABILITE DU COUT
19 DPDF DESIRABILITE DE LA PFD
20 DESG DESIRABILITE GLOBALE;
21
22 POSITIVE VARIABLE X1 X2 X3 X4;
23
24 SCALAR DIFZ1 MOITIE DE LA DIFFERENCE DE Z1 / 8.5 /
25 MOYZ1 MOYENNE DE Z1 / 48.0 /
26 DIFZ2 MOITIE DE LA DIFFERENCE DE Z2 / 244.0 /
27 MOYZ2 MOYENNE DE Z2 / 560.0 /
28 CPM COUT DE LA PMM / 275.0 /
29 CPTM COUT DE LA PTM / 250.0 /
30 CPFD COUT DE LA PFD / 450.0 /
31 CPKSBR COUT DE LA PKSBR / 700.0 /
32 CKWH COUT DE L'ELECTRICITE / 0.04 /
33 GRAM GRAMMAGE (VALEUR NON-CODEE) / 48.0 /
34 Z1 GRAMMAGE (VALEUR CODEE) / 0.0 /;
35
36 EQUATIONS LOIMEL SOMME DES FRACTIONS DOIT ETRE EGALE A 1.0
37 FRAFF DECODAGE DE Z2
38 FCSF MODELE DE L'INDICE D'EGOUTTAGE
39 CCSFB CONTRAINTE DE L'INDICE D'EGOUTTAGE (LIMITE BASSE)
40 CCSFH CONTRAINTE DE L'INDICE D'EGOUTTAGE (LIMITE HAUTE)
41 FECLAT MODELE DE L'INDICE D'ECLATEMENT
42 CECLAT CONTRAINTE POUR L'INDICE D'ECLATEMENT

```

```

43      FLR      MODELE DE LA LONGUEUR DE RUPTURE
44      CLR      CONTRAINTE DE LA LONGUEUR DE RUPTURE
45      FBLANC   MODELE DE LA BLANCHEUR
46      CBLANC   CONTRAINTE DE LA BLANCHEUR
47      FDECH    MODELE DE LA DECHIRURE
48      CDECH    CONTRAINTE DE LA DECHIRURE
49      FDDECH   FONCTION DE DESIRABILITE DE LA DECHIRURE
50      FOPAC    MODELE DE L'OPACITE
51      COPAC    CONTRAINTE DE L'OPACITE
52      FDOPAC   FONCTION DE DESIRABILITE DE L'OPACITE
53      FCOUT    COUT DU MELANGE
54      FDCOUT   FONCTION DE DESIRABILITE DU COUT
55      CX1      CONTRAINTE POUR LA PMM
56      CX2      CONTRAINTE POUR LA PTM

```

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:23 PAGE 2
 OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES

```

57      CX3      CONTRAINTE POUR LA PFD
58      CX4      CONTRAINTE POUR LA PKSBR
59      FDPFD    FONCTION DE DESIRABILITE DE LA PFD
60      FDESG    FONCTION DE DESIRABILITE GLOBALE;
61
62  LOIMEL..  X1 + X2 + X3 + X4                                =E=
                                                         1.0;
63  FRAFF..  DIFZ2*Z2 + MOYZ2                                =E=
                                                         RAFF;
64  FCSF..   42.6832*X1 + 90.9691*X2 + 357.4776*X3 + 371.1982*X4 -
65           117.1748*X4*Z2 - 12.0946*X4*Z2*Z2 - 353.8323*X1*X3 -
66           291.0878*X1*X4 - 243.1216*X2*X3 - 150.5993*X2*X4 +
67           137.7033*X1*X4*Z2 + 105.6444*X2*X4*Z2            =E=
                                                         CSF;
68  CCSFB..  CSF                                              =G=
                                                         100.0;
69  CCSFH..  CSF                                              =L=
                                                         150.0;
70  FECLAT.. (88.8645*X1 + 114.6775*X2 + 132.2018*X3 + 341.2898*X4 +
71           20.3578*X1*Z1 + 28.1611*X2*Z1 + 26.9238*X3*Z1 +
72           72.0707*X4*Z1 + 27.3410*X4*Z2 + 5.3003*X4*Z1*Z2 -
73           5.5911*X4*Z2*Z2 - 67.0988*X1*X4 - 26.2319*X1*X4*Z1 -
74           29.2478*X1*X4*Z2) / GRAM                        =E=
                                                         ECLAT;
75  CECLAT.. ECLAT                                           =G=
                                                         1.6;
76  FLR..    (181.1874*X1 + 207.6022*X2 + 224.5524*X3 + 410.1453*X4 +
77           41.4807*X1*Z1 + 48.9593*X2*Z1 + 42.5333*X3*Z1 +
78           81.2970*X4*Z1 + 24.8735*X4*Z2) / GRAM           =E= LR;
79  CLR..    LR                                              =G=
                                                         3.2;
80  FBLANC.. 56.3752*X1 + 57.9324*X2 + 76.3945*X3 + 70.6751*X4 +
81           2.8165*X1*X2 - 24.8425*X1*X3 - 23.1062*X1*X4 -
82           21.2005*X2*X3 - 22.1678*X2*X4 - 1.7262*X1*X3*Z1 -
83           2.1905*X2*X4*Z1 - 2.0230*X1*X4*Z2 + 2.4539*X2*X4*Z2*Z2 =E=
                                                         BLANC;
84  CBLANC.. BLANC                                           =G=
                                                         55.0;
85  FDECH..  (224.1334*X1 + 387.9186*X2 + 446.1279*X3 + 538.6842*X4 +
86           54.9188*X1*Z1 + 95.7684*X2*Z1 + 110.1772*X3*Z1 +
87           120.3792*X4*Z1 - 35.5910*X4*Z2 + 58.1672*X1*X3 +
88           407.4886*X1*X4 + 167.1274*X2*X4 + 184.7998*X3*X4 +
89           100.8965*X1*X4*Z1 + 58.1739*X2*X4*Z1 + 63.5746*X3*X4*Z1 +
90           46.4986*X3*X4*Z2 + 55.4865*X2*X4*Z1*Z1) / GRAM  =E=
                                                         DECH;
91  CDECH..  DECH                                           =G=

```

```

8.0;
92  FDDECH..  (DECH - 3.0) / (13.0 - 3.0)      =E=
                                                DDECH;

93  FOPAC..    97.5361*X1 + 93.0983*X2 + 76.7002*X3 + 66.6083*X4 +
94              1.6171*X1*Z1 + 3.4081*X2*Z1 + 5.5388*X3*Z1 + 4.7144*X4*Z1 -
95              1.7626*X4*Z2 + 0.4843*X4*Z1*Z2 - 0.5951*X1*Z1*Z1 -
96              0.7141*X2*Z1*Z1 - 0.7787*X3*Z1*Z1 - 0.6715*X4*Z1*Z1 +
97              3.1067*X1*X2 + 24.1031*X1*X3 + 34.6267*X1*X4 + 14.8490*X2*X3
                                                +

GAMS 2.05/S PC AT/XT                      95/01/22 13:32:23  PAGE      3
OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES

98              21.5188*X2*X4 + 5.9508*X3*X4 + 4.6621*X1*X4*Z1 +
99              3.7195*X2*X4*Z1 + 2.2931*X1*X4*Z2 + 2.3897*X2*X4*Z2 +
100             1.7596*X3*X4*Z2 - 2.3124*X1*X4*Z1*Z1      =E=
                                                OPAC;
101  COPAC..    OPAC      =G=
                                                89.0;
102  FDOPAC..  (OPAC - 65.0) / (100 - 65.0)      =E=
                                                DOPAC;
103  FCOUT..    CPMM*X1 + CPTM*X2 + CPFD*X3 + (CPKSBR + RAFF*CKWH)*X4 =E=
                                                COUT;
104  FDCOUT..  (750.0 - COUT) / (750.0 - 250.0)  =E=
                                                DCOUT;
105  CX1..      X1      =L=
                                                1.0;
106  CX2..      X2      =L=
                                                1.0;
107  CX3..      X3      =L=
                                                1.0;
108  CX4..      X4      =L=
                                                1.0;
109  FDPFD..    X3 - 0.0      =E=
                                                DFPD;
110  FDESG..    (DOPAC**3 * DDECH**2 * DCOUT**2 * DFPD) **.125 =E=
                                                DESG;
111
112  MODEL OPTIMISE /ALL/ ;
113
114  X1.LO = 0.0;    X2.LO = 0.0;    X3.LO = 0.0;    X4.LO = 0.0;
115  X1.UP = 1.0;    X2.UP = 1.0;    X3.UP = 1.0;    X4.UP = 1.0;
116  Z2.LO = -1.41;    Z2.UP = 1.41;
117  DECH.LO = 3.0;    COUT.UP = 750.0;    OPAC.LO = 65.0;
118
119  SOLVE OPTIMISE USING NLP MAXIMIZING DESG;
120
121  PARAMETER TEA    ENERGIE ABSORBEE A LA RUPTURE;
122
123  TEA = 16.2853*X1.L + 26.2636*X2.L + 40.7192*X3.L + 93.5016*X4.L +
124        4.5598*X1.L*Z1 + 8.9031*X2.L*Z1 + 12.0708*X3.L*Z1 +
125        25.6840*X4.L*Z1 + 11.6504*X4.L*Z2.L + 15.0676*X4.L*Z1*Z1 +
126        19.9949*X1.L*X4.L*Z1 - 38.0802*X1.L*X4.L*Z2.L -
127        16.9412*X1.L*X4.L*Z1*Z1 - 18.5109*X2.L*X4.L*Z1*Z1;
128
129  PARAMETER LR30    LONGUEUR DE RUPTURE HUMIDE 30% ;
130
131  LR30 = (13027.35*X1.L + 14066.38*X2.L + 7589.44*X3.L + 15338.87*X4.L +
132        3481.17*X1.L*Z1 + 3918.42*X2.L*Z1 + 2126.35*X3.L*Z1 +
133        3624.73*X4.L*Z1 +
134        2636.37*X4.L*Z2.L + 1026.81*X4.L*Z1*Z2.L + 4940.80*X1.L*X3.L +
135        14110.32*X1.L*X4.L + 8130.71*X2.L*X4.L - 2754.39*X1.L*X2.L*Z1 +
136        3992.44*X1.L*X4.L*Z1 + 2474.74*X2.L*X4.L*Z1 -
137        2242.61*X1.L*X4.L*Z2.L) / GRAM;
138  PARAMETER TEA30    ENERGIE ABSORBEE A LA RUPTURE HUMIDE 30% ;

```

139
 140 TEA30 = 3.6442*X1.L + 3.3614*X2.L + 2.7844*X3.L + 7.0828*X4.L +

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:23 PAGE 4
 OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES

141 0.9636*X1.L*Z1 + 1.0160*X2.L*Z1 + 0.8957*X3.L*Z1 +
 1.9088*X4.L*Z1 +
 142 2.3535*X4.L*Z2.L + 0.8857*X4.L*Z1*Z2.L + 0.2955*X4.L*Z2.L*Z2.L +
 143 2.6639*X1.L*X3.L + 7.8455*X1.L*X4.L + 1.7038*X2.L*X3.L +
 144 6.6942*X2.L*X4.L + 1.2921*X1.L*X3.L*Z1 + 1.7031*X1.L*X4.L*Z1 +
 145 2.2295*X2.L*X4.L*Z1 - 1.7670*X1.L*X4.L*Z2.L -
 1.9289*X2.L*X4.L*Z2.L -
 146 2.2286*X3.L*X4.L*Z2.L - 0.8814*X3.L*X4.L*Z2.L*Z2.L;
 147
 148 DISPLAY X1.L, X2.L, X3.L, X4.L, Z1, GRAM, Z2.L,
 RAFF.L,
 149 CSF.L, ECLAT.L, DECH.L, LR.L, TEA, LR30, TEA30,
 OPAC.L, BLANC.L,
 150 COUT.L, DESG.L;
 151

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:23 PAGE 5
 OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
 SYMBOL LISTING

SYMBOL	TYPE	REFERENCES
BLANC	VAR	DECLARED 12 IMPL-ASN 119 REF 83 84 149
CBLANC	EQU	DECLARED 46 DEFINED 84 IMPL-ASN 119 REF 112
CCSFB	EQU	DECLARED 39 DEFINED 68 IMPL-ASN 119 REF 112
CCSFH	EQU	DECLARED 40 DEFINED 69 IMPL-ASN 119 REF 112
CDECH	EQU	DECLARED 48 DEFINED 91 IMPL-ASN 119 REF 112
CECLAT	EQU	DECLARED 42 DEFINED 75 IMPL-ASN 119 REF 112
CKWH	PARAM	DECLARED 32 DEFINED 32 REF 103
CLR	EQU	DECLARED 44 DEFINED 79 IMPL-ASN 119 REF 112
COPAC	EQU	DECLARED 51 DEFINED 101 IMPL-ASN 119 REF 112
COUT	VAR	DECLARED 17 IMPL-ASN 119 ASSIGNED 117 REF 103 104 150
CPFD	PARAM	DECLARED 30 DEFINED 30 REF 103
CPKSBR	PARAM	DECLARED 31 DEFINED 31 REF 103
CPMM	PARAM	DECLARED 28 DEFINED 28 REF 103
CPTM	PARAM	DECLARED 29 DEFINED 29 REF 103
CSF	VAR	DECLARED 9 IMPL-ASN 119 REF 67 68 69 149
CX1	EQU	DECLARED 55 DEFINED 105 IMPL-ASN 119 REF 112
CX2	EQU	DECLARED 56 DEFINED 106 IMPL-ASN 119 REF 112
CX3	EQU	DECLARED 57 DEFINED 107 IMPL-ASN 119 REF 112
CX4	EQU	DECLARED 58 DEFINED 108 IMPL-ASN 119 REF 112
DCOUT	VAR	DECLARED 18 IMPL-ASN 119 REF 104 110
DDECH	VAR	DECLARED 15 IMPL-ASN 119 REF 92 110

DECH	VAR	DECLARED	13	IMPL-ASN	119	ASSIGNED	117
		REF	90	91	92	149	
DESG	VAR	DECLARED	20	IMPL-ASN	119	REF	110
		119	150				
DIFZ1	PARAM	DECLARED	24	DEFINED	24		
DIFZ2	PARAM	DECLARED	26	DEFINED	26	REF	63
DOPAC	VAR	DECLARED	16	IMPL-ASN	119	REF	102
		110					
DPFD	VAR	DECLARED	19	IMPL-ASN	119	REF	109
		110					
ECLAT	VAR	DECLARED	10	IMPL-ASN	119	REF	74
		75	149				
FBLANC	EQU	DECLARED	45	DEFINED	80	IMPL-ASN	119
		REF	112				
FCOUT	EQU	DECLARED	53	DEFINED	103	IMPL-ASN	119
		REF	112				

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:23 PAGE 6
 OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
 SYMBOL LISTING

SYMBOL	TYPE	REFERENCES					
FCSF	EQU	DECLARED	38	DEFINED	64	IMPL-ASN	119
		REF	112				
FDCOUT	EQU	DECLARED	54	DEFINED	104	IMPL-ASN	119
		REF	112				
FDDECH	EQU	DECLARED	49	DEFINED	92	IMPL-ASN	119
		REF	112				
FDECH	EQU	DECLARED	47	DEFINED	85	IMPL-ASN	119
		REF	112				
FDESG	EQU	DECLARED	60	DEFINED	110	IMPL-ASN	119
		REF	112				
FDOPAC	EQU	DECLARED	52	DEFINED	102	IMPL-ASN	119
		REF	112				
FDPFD	EQU	DECLARED	59	DEFINED	109	IMPL-ASN	119
		REF	112				
FECLAT	EQU	DECLARED	41	DEFINED	70	IMPL-ASN	119
		REF	112				
FLR	EQU	DECLARED	43	DEFINED	76	IMPL-ASN	119
		REF	112				
FOPAC	EQU	DECLARED	50	DEFINED	93	IMPL-ASN	119
		REF	112				
FRAFF	EQU	DECLARED	37	DEFINED	63	IMPL-ASN	119
		REF	112				
GRAM	PARAM	DECLARED	33	DEFINED	33	REF	74
		78	90	136	148		
LOIMEL	EQU	DECLARED	36	DEFINED	62	IMPL-ASN	119
		REF	112				
LR	VAR	DECLARED	11	IMPL-ASN	119	REF	78
		79	149				
LR30	PARAM	DECLARED	129	ASSIGNED	131	REF	149
MOYZ1	PARAM	DECLARED	25	DEFINED	25		
MOYZ2	PARAM	DECLARED	27	DEFINED	27	REF	63
OPAC	VAR	DECLARED	14	IMPL-ASN	119	ASSIGNED	117
		REF	100	101	102	149	
OPTIMISE	MODEL	DECLARED	112	DEFINED	112	REF	119
RAFF	VAR	DECLARED	8	IMPL-ASN	119	REF	63
		103	148				
TEA	PARAM	DECLARED	121	ASSIGNED	123	REF	149
TEA30	PARAM	DECLARED	138	ASSIGNED	140	REF	149
X1	VAR	DECLARED	3	IMPL-ASN	119	ASSIGNED	114
		115	REF	22	62	64	65
		66	67	70	71	2*73	74
		76	77	80	3*81	82	83

TEA30 ENERGIE ABSORBEE A LA RUPTURE HUMIDE 30%
Z1 GRAMMAGE (VALEUR CODEE)

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:23 PAGE 8
OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
SYMBOL LISTING

VARIABLES

BLANC	BLANCHEUR
COUT	COUT DU MELANGE OPTIMAL
CSF	INDICE D'EGOUTTAGE
DCOUT	DESIRABILITE DU COUT
DDECH	DESIRABILITE DE LA DECHIRURE
DECH	INDICE DE DECHIRURE
DESG	DESIRABILITE GLOBALE
DOPAC	DESIRABILITE DE L'OPACITE
DPFD	DESIRABILITE DE LA PFD
ECLAT	INDICE D'ECLATEMENT
LR	LONGUEUR DE RUPTURE
OPAC	OPACITE
RAFF	RAFFINAGE DE LA PKSBR (VALEUR NON-CODEE)
X1	PATE MECANIQUE DE MEULES (PMM)
X2	PATE THERMOMECHANIQUE (PTM)
X3	PATE DE FIBRES DESENCREES (PFD)
X4	PATE KRAFT SEMI-BLANCHIE DE RESINEUX (PKSBR)
Z2	RAFFINAGE DE LA PKSBR (VALEUR CODEE)

EQUATIONS

CBLANC	CONTRAINTES DE LA BLANCHEUR
CCSFB	CONTRAINTES DE L'INDICE D'EGOUTTAGE (LIMITE BASSE)
CCSFH	CONTRAINTES DE L'INDICE D'EGOUTTAGE (LIMITE HAUTE)
CDECH	CONTRAINTES DE LA DECHIRURE
CECLAT	CONTRAINTES POUR L'INDICE D'ECLATEMENT
CLR	CONTRAINTES DE LA LONGUEUR DE RUPTURE
COPAC	CONTRAINTES DE L'OPACITE
CX1	CONTRAINTES POUR LA PMM
CX2	CONTRAINTES POUR LA PTM
CX3	CONTRAINTES POUR LA PFD
CX4	CONTRAINTES POUR LA PKSBR
FBLANC	MODELE DE LA BLANCHEUR
FCOUT	COUT DU MELANGE
FCSF	MODELE DE L'INDICE D'EGOUTTAGE
FDCOUT	FONCTIONS DE DESIRABILITE DU COUT
FDDECH	FONCTIONS DE DESIRABILITE DE LA DECHIRURE
FDECH	MODELE DE LA DECHIRURE
FDESG	FONCTIONS DE DESIRABILITE GLOBALE
FDOAC	FONCTIONS DE DESIRABILITE DE L'OPACITE
FDPFD	FONCTIONS DE DESIRABILITE DE LA PFD
FECLAT	MODELE DE L'INDICE D'ECLATEMENT
FLR	MODELE DE LA LONGUEUR DE RUPTURE
FOPAC	MODELE DE L'OPACITE
FRAFF	DECODAGE DE Z2
LOIMEL	SOMME DES FRACTIONS DOIT ETRE EGALE A 1.0

MODELS

OPTIMISE

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:23 PAGE 9
OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
SYMBOL LISTING

COMPILATION TIME = 0.020 MINUTES

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:23 PAGE 10
 OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
 EQUATION LISTING SOLVE OPTIMISE USING NLP FROM LINE 119

---- LOIMEL =E= SOMME DES FRACTIONS DOIT ETRE EGALE A 1.0

LOIMEL.. $X1 + X2 + X3 + X4 =E= 1$; (LHS = 0 ***)

---- FRAFF =E= DECODAGE DE Z2

FRAFF.. $244 * Z2 - RAFF =E= -560$; (LHS = 0 ***)

---- FCSF =E= MODELE DE L'INDICE D'EGOUTTAGE

FCSF.. $(42.6832) * X1 + (90.9691) * X2 + (357.4776) * X3 + (371.1982) * X4 + (0) * Z2$
 $- CSF =E= 0$; (LHS = 0)

---- CCSFB =G= CONTRAINTE DE L'INDICE D'EGOUTTAGE (LIMITE BASSE)

CCSFB.. $CSF =G= 100$; (LHS = 0 ***)

---- CCSFH =L= CONTRAINTE DE L'INDICE D'EGOUTTAGE (LIMITE HAUTE)

CCSFH.. $CSF =L= 150$; (LHS = 0)

---- FECLAT =E= MODELE DE L'INDICE D'ECLATEMENT

FECLAT.. $(1.8513) * X1 + 2.3891 * X2 + 2.7542 * X3 + (7.1102) * X4 + (0) * Z2 - ECLAT$
 $=E= 0$; (LHS = 0)

---- CECLAT =G= CONTRAINTE POUR L'INDICE D'ECLATEMENT

CECLAT.. $ECLAT =G= 1.6$; (LHS = 0 ***)

---- FLR =E= MODELE DE LA LONGUEUR DE RUPTURE

FLR.. $3.7747 * X1 + 4.325 * X2 + 4.6782 * X3 + (8.5447) * X4 + (0) * Z2 - LR =E= 0$;
 (LHS = 0)

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:23 PAGE 11
 OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
 EQUATION LISTING SOLVE OPTIMISE USING NLP FROM LINE 119

----- CLR =G= CONTRAINTE DE LA LONGUEUR DE RUPTURE

CLR.. LR =G= 3.2 ; (LHS = 0 ***)

----- FBLANC =E= MODELE DE LA BLANCHEUR

FBLANC.. (56.3752)*X1 + (57.9324)*X2 + (76.3945)*X3 + (70.6751)*X4 + (0)*Z2

- BLANC =E= 0 ; (LHS = 0)

---- CBLANC =G= CONTRAINTE DE LA BLANCHEUR

```
CBLANC..  BLANC =G= 55 ; (LHS = 0 ***)
```

----- FDECH =E= MODELE DE LA DECHIRURE

$$\text{FDECH}.. \quad (4.6694)*X1 + (8.0816)*X2 + (9.2943)*X3 + (11.2226)*X4 + (0)*Z2 - \text{DECH}$$
$$=E= 0 \quad ; \quad (\text{LHS} = -3 \quad \star \star \star)$$

----- CDECH =G= CONTRAINTE DE LA DECHIRURE

CDECH.. DECH =G= 8 ; (LHS = 3 ***)

----- FDDECH =E= FONCTION DE DESIRABILITE DE LA DECHIRURE

FDDECH... 0.1*DECH - DDECH =E= 0.3 ; (LHS = 0.3)

----- FOPAC =E= MODELE DE L'OPACITE

$$\text{FOPAC} \dots (97.5361) * X1 + (93.0983) * X2 + (76.7002) * X3 + (66.6083) * X4 + (0) * Z2$$

- OPAC =E= 0 ; (LHS = -65 ***)

----- COPAC =G= CONTRAINTE DE L'OPACITE

COPAC.. OPAC =G= 89 ; (LHS = 65 ***)

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:23 PAGE 12
OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
EQUATION LISTING SOLVE OPTIMISE USING NLP FROM LINE 119

----- FDOPAC =E= FONCTION DE DESIRABILITE DE L'OPACITE

FDOPAC.. 0.0286*OPAC - DOPAC ≈E≈ 1.8571 ; (LHS = 1.8571)

----- FCOUT =E= COUT DU MELANGE

$$\text{FCOUT}.. \quad 275 \cdot X_1 + 250 \cdot X_2 + 450 \cdot X_3 + (700) \cdot X_4 + (0) \cdot \text{RAFF} - \text{COUT} = E = 0 ;$$

$$(\text{LHS} = 0)$$

----- FDCOUT =E= FONCTION DE DESIRABILITE DU COUT

```
FDCOUT.. - 0.002*COUT - DCOUT =E= -1.5 ; (LHS = 0 ***)
```

```

----- CX1          =L=  CONTRAINTE POUR LA PMM

```

CX1.. X1 =L= 1 ; (LHS = 0)

----- CX2 =L= CONTRAINTE POUR LA PTM

$$CX2.. \quad X2 = L = 1 \quad ; \quad (LHS = 0)$$

----- CX3 =L= CONTRAINTE POUR LA PFD

CX3.. X3 =L= 1 ; (LHS = 0)

----- CX4 =L= CONTRAINTE POUR LA PKSBR

CX4.. X4 =L= 1 ; (LHS = 0)

----- FDPFD =E= FONCTION DE DESIRABILITE DE LA PFD

$$\text{FDPFD} \dots X3 - \text{DPFD} = E = 0 ; (\text{LHS} = 0)$$

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:23 PAGE 13
OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
EQUATION LISTING SOLVE OPTIMISE USING NLP FROM LINE 119

----- FDESG =E= FONCTION DE DESIRABILITE GLOBALE

```
FDESG.. (0)*DDECH + (0)*DOPAC + (0)*DCOUT + (0)*DPFD - DESG =E= 0 ; (LHS = 0)
```

```
GAMS 2.05/S PC AT/XT                      95/01/22 13:32:23  PAGE    14
OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
COLUMN LISTING      SOLVE OPTIMISE USING NLP FROM LINE 119
```

----- X1 PATE MECANIQUE DE MEULES (PMM)

```

X1
      1      (.LO, .L, .UP = 0, 0, 1)
      (42.6832) LOIMEL
      (1.8513) FCSF
      3.7747 FECLAT
      (56.3752) FLR
      (56.3752) FBLANC

```

```

(4.6694) FDECH
(97.5361) FOPAC
275      FCOUT
1        CX1

```

---- X2 PATE THERMOMECHANIQUE (PTM)

```

X2
      (.LO, .L, .UP = 0, 0, 1)
1      LOIMEL
(90.9691) FCSF
2.3891 FECLAT
4.325   FLR
(57.9324) FBLANC
(8.0816) FDECH
(93.0983) FOPAC
250     FCOUT
1       CX2

```

---- X3 PATE DE FIBRES DESENCREES (PFD)

```

X3
      (.LO, .L, .UP = 0, 0, 1)
1      LOIMEL
(357.4776) FCSF
2.7542 FECLAT
4.6782 FLR
(76.3945) FBLANC
(9.2943) FDECH
(76.7002) FOPAC
450     FCOUT
1       CX3
1       FDPFD

```

```

GAMS 2.05/S PC AT/XT                      95/01/22 13:32:23  PAGE    15
OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
COLUMN LISTING      SOLVE OPTIMISE USING NLP FROM LINE 119

```

---- X4 PATE KRAFT SEMI-BLANCHIE DE RESINEUX (PKSBR)

```

X4
      (.LO, .L, .UP = 0, 0, 1)
1      LOIMEL
(371.1982) FCSF
(7.1102) FECLAT
(8.5447) FLR
(70.6751) FBLANC
(11.2226) FDECH
(66.6083) FOPAC
(700)    FCOUT
1       CX4

```

---- Z2 RAFFINAGE DE LA PKSBR (VALEUR CODEE)

```

Z2
      (.LO, .L, .UP = -1.41, 0, 1.41)
244     FRAFF
(0)     FCSF

```

```

(0)    FECLAT
(0)    FLR
(0)    FBLANC
(0)    FDECH
(0)    FOPAC

```

```

---- RAFF      RAFFINAGE DE LA PKSBR (VALEUR NON-CODEE)

```

```

RAFF
      (.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
-1    FRAFF
(0)   FCOUT

```

```

---- CSF      INDICE D'EGOUTTAGE

```

```

CSF
      (.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
-1    FCSF
      1    CCSFB
      1    CCSFH

```

```

GAMS 2.05/S PC AT/XT                      95/01/22 13:32:23  PAGE    16
OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
COLUMN LISTING      SOLVE OPTIMISE USING NLP FROM LINE 119

```

```

---- ECLAT    INDICE D'ECLATEMENT

```

```

ECLAT
      (.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
-1    FECLAT
      1    CECLAT

```

```

---- LR      LONGUEUR DE RUPTURE

```

```

LR
      (.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
-1    FLR
      1    CLR

```

```

---- BLANC    BLANCHEUR

```

```

BLANC
      (.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
-1    FBLANC
      1    CBLANC

```

```

---- DECH    INDICE DE DECHIRURE

```

```

DECH
      (.LO, .L, .UP = 3, 3, +INF)
-1    FDECH
      1    CDECH
      0.1  FDDECH

```

----- OPAC OPACITE

```
OPAC
      (.LO, .L, .UP = 65, 65,  +INF)
-1    FOPAC
 1    COPAC
0.0286 FOPAC
```

----- DDECH DESIRABILITE DE LA DECHIRURE

```

DDECH
      (.LO, .L, .UP =  -INF, 0,  +INF)
-1    FDDECH
(0)    FDESG

```

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:23 PAGE 17
OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
COLUMN LISTING SOLVE OPTIMISE USING NLP FROM LINE 119

----- DOPAC DESIRABILITE DE L'OPACITE

```

DOPAC
      (.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
-1    FDOPAC
(0)   FDESG

```

----- COUT COUT DU MELANGE OPTIMAL

```

COUNT      (.LO, .L, .UP =  -INF, 0, 750)
-1          FCOUNT
-0.002      FDCOUNT

```

----- DCOUT DESIRABILITE DU COUT

```

DCOUT
      (.LO, .L, .UP =  -INF, 0,  +INF)
-1    FDCOUT
(0)   FDESG

```

----- DPFD DESIRABILITE DE LA PFD

```

DPFD
      (.LO, .L, .UP =  -INF, 0,  +INF)
-1    FDPFD
(0)   FDESG

```

---- DESG DESIRABILITE GLOBALE

```

DESG
      (-1, .LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
FDESG

```


GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:23 PAGE 18
 OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
 MODEL STATISTICS SOLVE OPTIMISE USING NLP FROM LINE 119

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	25	SINGLE EQUATIONS	25
BLOCKS OF VARIABLES	18	SINGLE VARIABLES	18
NON ZERO ELEMENTS	72	NON LINEAR N-Z	31
DERIVATIVE POOL	12	CONSTANT POOL	71
CODE LENGTH	1070		

GENERATION TIME = 0.020 MINUTES

EXECUTION TIME = 0.049 MINUTES

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:36 PAGE 19
 OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
 SOLUTION REPORT SOLVE OPTIMISE USING NLP FROM LINE 119

S O L V E S U M M A R Y

MODEL	OPTIMISE	OBJECTIVE	DESG
TYPE	NLP	DIRECTION	MAXIMIZE
SOLVER	MINOS5	FROM LINE	119

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION

**** MODEL STATUS 2 LOCALLY OPTIMAL

**** OBJECTIVE VALUE 0.6518

RESOURCE USAGE, LIMIT	0.127	1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	97	1000
EVALUATION ERRORS	0	0

M I N O S 5.2 (Mar 1988)

= = = = =

B. A. Murtagh, University of New South Wales
 and

P. E. Gill, W. Murray, M. A. Saunders and M. H. Wright
 Systems Optimization Laboratory, Stanford University.

WORK SPACE NEEDED (ESTIMATE) -- 2257 WORDS.
 WORK SPACE AVAILABLE -- 8100 WORDS.

EXIT -- OPTIMAL SOLUTION FOUND

MAJOR ITNS, LIMIT	19	50
FUNOBJ, FUNCON CALLS	203	208
SUPERBASICS	2	
INTERPRETER USAGE	.04	
NORM RG / NORM PI	2.539E-09	

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- EQU LOIMEL	1.000	1.000	1.000	1.116
---- EQU FRAFF	-560.000	-560.000	-560.000	EPS
---- EQU FCSF	.	.	.	EPS
---- EQU CCSFB	100.000	143.648	+INF	EPS
---- EQU CCSFH	-INF	143.648	150.000	.
---- EQU FECLAT	.	.	.	EPS

----	EQU CECLAT	1.600	2.516	+INF	.
----	EQU FLR	.	.	.	EPS
----	EQU CLR	3.200	4.445	+INF	.
----	EQU FBLANC	.	.	.	EPS
----	EQU CBLANC	55.000	60.847	+INF	.
----	EQU FDECH	.	.	.	-0.030
----	EQU CDECH	8.000	8.427	+INF	EPS
----	EQU FDDECH	0.300	0.300	0.300	-0.300
----	EQU FOPAC	.	.	.	-0.010
----	EQU COPAC	89.000	90.111	+INF	.
----	EQU FDOPAC	1.857	1.857	1.857	-0.341
----	EQU FCOUT	.	.	.	3.9892E-4
----	EQU FDCOUT	-1.500	-1.500	-1.500	-0.199
----	EQU CX1	-INF	0.069	1.000	.

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:36 PAGE 20
 OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
 SOLUTION REPORT SOLVE OPTIMISE USING NLP FROM LINE 119

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL	
----	EQU CX2	-INF	0.482	1.000	.
----	EQU CX3	-INF	0.449	1.000	.
----	EQU CX4	-INF	.	1.000	.
----	EQU FDPFD	.	.	.	-0.182
----	EQU FDESG	.	.	.	1.000

LOIMEL SOMME DES FRACTIONS DOIT ETRE EGALE A 1.0
 FRAFF DECODAGE DE Z2
 FCSF MODELE DE L'INDICE D'EGOUTTAGE
 CCSFB CONTRAINTE DE L'INDICE D'EGOUTTAGE (LIMITE BASSE)
 CCSFH CONTRAINTE DE L'INDICE D'EGOUTTAGE (LIMITE HAUTE)
 FECLAT MODELE DE L'INDICE D'ECLATEMENT
 CECLAT CONTRAINTE POUR L'INDICE D'ECLATEMENT
 FLR MODELE DE LA LONGUEUR DE RUPTURE
 CLR CONTRAINTE DE LA LONGUEUR DE RUPTURE
 FBLANC MODELE DE LA BLANCHEUR
 CBLANC CONTRAINTE DE LA BLANCHEUR
 FDECH MODELE DE LA DECHIRURE
 CDECH CONTRAINTE DE LA DECHIRURE
 FDDECH FONCTION DE DESIRABILITE DE LA DECHIRURE
 FOPAC MODELE DE L'OPACITE
 COPAC CONTRAINTE DE L'OPACITE
 FDOPAC FONCTION DE DESIRABILITE DE L'OPACITE
 FCOUT COUT DU MELANGE
 FDCOUT FONCTION DE DESIRABILITE DU COUT
 CX1 CONTRAINTE POUR LA PMM
 CX2 CONTRAINTE POUR LA PTM
 CX3 CONTRAINTE POUR LA PFD
 CX4 CONTRAINTE POUR LA PKSBR
 FDPFD FONCTION DE DESIRABILITE DE LA PFD
 FDESG FONCTION DE DESIRABILITE GLOBALE

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL	
----	VAR X1	.	0.069	1.000	.
----	VAR X2	.	0.482	1.000	.
----	VAR X3	.	0.449	1.000	.
----	VAR X4	.	.	1.000	-0.135
----	VAR Z2	-1.410	-1.410	1.410	EPS
----	VAR RAFF	-INF	215.960	+INF	.
----	VAR CSF	-INF	143.648	+INF	.
----	VAR ECLAT	-INF	2.516	+INF	.
----	VAR LR	-INF	4.445	+INF	.
----	VAR BLANC	-INF	60.847	+INF	.

```

---- VAR DECH          3.000      8.427      +INF      .
---- VAR OPAC          65.000     90.111      +INF      .
---- VAR DDECH         -INF       0.543      +INF      .
---- VAR DOPAC         -INF       0.717      +INF      .
---- VAR COUT          -INF      341.505     750.000      .
---- VAR DCOUT         -INF       0.817      +INF      .
---- VAR DPFDD         -INF       0.449      +INF      .
---- VAR DESG          -INF       0.652      +INF      .

```

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:36 PAGE 21
 OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
 SOLUTION REPORT SOLVE OPTIMISE USING NLP FROM LINE 119

```

X1      PATE MECANIQUE DE MEULES (PMM)
X2      PATE THERMOMECHANIQUE (PTM)
X3      PATE DE FIBRES DESENCREES (PFD)
X4      PATE KRAFT SEMI-BLANCHIE DE RESINEUX (PKSBR)
Z2      RAFFINAGE DE LA PKSBR (VALEUR CODEE)
RAFF    RAFFINAGE DE LA PKSBR (VALEUR NON-CODEE)
CSF     INDICE D'EGOUTTAGE
ECLAT   INDICE D'ECLATEMENT
LR      LONGUEUR DE RUPTURE
BLANC   BLANCHEUR
DECH    INDICE DE DECHIRURE
OPAC    OPACITE
DDECH   DESIRABILITE DE LA DECHIRURE
DOPAC   DESIRABILITE DE L'OPACITE
COUT    COUT DU MELANGE OPTIMAL
DCOUT   DESIRABILITE DU COUT
DPFDD   DESIRABILITE DE LA PFD
DESG    DESIRABILITE GLOBALE

```

```

**** REPORT SUMMARY :      0      NONOPT
                           0      INFEASIBLE
                           0      UNBOUNDED
                           0      ERRORS

```

GAMS 2.05/S PC AT/XT 95/01/22 13:32:36 PAGE 22
 OPTIMISATION DES MODELES DE REGRESSION DES PROPRIETES PAPETIERES
 E X E C U T I N G

```

---- 148 VARIABLE X1.L      =      0.069 PATE MECANIQUE DE MEULES
                                           (PMM)
      VARIABLE X2.L      =      0.482 PATE THERMOMECHANIQUE (PTM)
      VARIABLE X3.L      =      0.449 PATE DE FIBRES DESENCREES
                                           (PFD)
      VARIABLE X4.L      =      0.000 PATE KRAFT SEMI-BLANCHIE
                                           DE RESINEUX (PKSBR)
      PARAMETER Z1       =      0.000 GRAMMAGE (VALEUR CODEE)
      PARAMETER GRAM     =      48.000 GRAMMAGE (VALEUR NON-CODEE)
      VARIABLE Z2.L      =     -1.410 RAFFINAGE DE LA PKSBR
                                           (VALEUR CODEE)
      VARIABLE RAFF.L     =     215.960 RAFFINAGE DE LA PKSBR
                                           (VALEUR NON-CODEE)
      VARIABLE CSF.L     =     143.648 INDICE D'EGOUTTAGE
      VARIABLE ECLAT.L   =      2.516 INDICE D'ECLATEMENT
      VARIABLE DECH.L    =      8.427 INDICE DE DECHIRURE
      VARIABLE LR.L      =      4.445 LONGUEUR DE RUPTURE
      PARAMETER TEA      =     32.060 ENERGIE ABSORBEE A LA
                                           RUPTURE
      PARAMETER LR30     =     234.187 LONGUEUR DE RUPTURE HUMIDE
                                           30%

```

PARAMETER	TEA30	=	3.573	ENERGIE ABSORBEE A LA
				RUPTURE HUMIDE 30%
VARIABLE	OPAC.L	=	90.111	OPACITE
VARIABLE	BLANC.L	=	60.847	BLANCHEUR
VARIABLE	COUT.L	=	341.505	COUT DU MELANGE OPTIMAL
VARIABLE	DESG.L	=	0.652	DESIRABILITE GLOBALE

**** FILE SUMMARY

INPUT C:\GAMS205\GAMSLIB\MELANGE.GMS
OUTPUT C:\GAMS205\GAMSLIB\MELANGE.LST

EXECUTION TIME = 0.014 MINUTES

ANNEXE E

TABLEAUX DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET OPTIQUES
SEMAINE No 1 - PLAN EXPÉRIMENTAL No 8

MÉLANGE No	8-1	8-2	8-3	8-4	8-5	8-6	8-7	8-8	8-9	8-10	8-11	8-12	8-13	8-14	8-15	8-16
COMPOSITION DU MÉLANGE																
PMM	1	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0.33	0.33	0.33	0	0.25	0.25
PTM	0	1	0	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0	0.33	0.25	0.25
PFD	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0.33	0	0.33	0.33	0.25	0.25
PKSBR_4	0	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0.33	0.25	0.25
INDICE D'ÉGOUTTAGE (CSF) (ml)	49	88	360	191	63	105	101	166	146	270	104	94	142	207	126	128
GRAMMAGE (g/m²)	47.7	48.0	48.2	47.9	47.7	48.9	48.8	47.9	48.3	49.4	48.8	47.3	48.2	48.5	48.3	47.9
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm³/g)	2.78	2.74	1.88	1.60	2.81	2.37	2.21	2.33	2.08	1.68	2.48	2.39	2.14	2.01	2.23	2.22
DENSITÉ APPARENTE (g/cm³)	0.36	0.36	0.53	0.62	0.36	0.42	0.45	0.43	0.48	0.60	0.40	0.42	0.47	0.50	0.45	0.45
INDICE D'ÉCLATEMENT (kPa*m²/g)	1.89	2.49	2.54	7.73	2.10	2.21	4.17	2.56	5.17	5.39	2.28	3.75	3.82	4.17	3.42	3.63
INDICE DE DÉCHIRURE (mN*m²/g)	4.62	8.20	9.61	10.55	6.10	7.17	9.14	8.86	9.47	11.45	7.55	8.73	9.48	9.71	9.00	9.23
RÉSISTANCE SÈCHE :																
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	3.58	3.82	4.47	8.85	4.23	3.98	5.78	4.31	6.72	6.53	4.14	5.97	5.32	5.96	5.54	5.26
ALLONGEMENT (%)	1.24	1.42	2.33	3.42	1.71	1.64	2.14	2.06	2.82	2.95	1.88	2.41	2.24	2.74	2.51	2.40
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	13	16	37	102	22	21	41	30	64	68	26	47	39	56	47	43
RÉSISTANCE HUMIDE (SICCITÉ = 30%) :																
LONGUEUR DE RUPTURE (m)	277	275	160	435	292	240	409	224	404	292	251	374	326	316	313	320
ALLONGEMENT (%)	5.6	4.5	8.5	13.0	5.5	6.7	10.0	6.6	9.1	10.3	6.5	7.8	8.9	8.5	7.8	8.3
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	3.6	2.9	3.0	11.7	4.0	3.7	9.2	3.5	8.5	5.8	3.7	6.8	6.3	5.8	5.6	6.0
BLANCHEUR MOYENNE ISO (%)	56.44	58.28	76.98	70.03	57.46	59.39	56.82	61.80	57.96	73.74	59.66	56.84	60.09	62.35	59.57	59.60
OPACITÉ MOYENNE ISO (%)	97.34	92.67	76.78	63.61	95.80	93.29	90.55	88.30	85.01	72.14	93.20	91.34	87.65	83.54	89.89	89.46
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m²/kg)	72.99	58.35	36.90	22.35	67.23	54.79	44.51	48.23	38.73	29.97	56.71	49.44	42.08	39.15	47.46	47.02
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m²/kg)	6.92	3.54	0.83	0.63	5.24	4.29	3.90	2.51	2.49	0.81	3.89	4.01	2.90	2.06	3.32	3.13

Tableau E.1 : Résultats de la première semaine

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET OPTIQUES
SEMAINE No 2 - PLAN EXPÉRIMENTAL No 9

MÉLANGE No	9-1	9-2	9-3	9-4	9-5	9-6	9-7	9-8	9-9	9-10	9-11	9-12	9-13	9-14	9-15	9-16
COMPOSITION DU MÉLANGE																
PMM	1	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0.33	0.33	0.33	0	0.25	0.25
PTM	0	1	0	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0	0.33	0.25	0.25
PFD	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0.33	0	0.33	0.33	0.25	0.25
PKSBR_2	0	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0.33	0.25	0.25
INDICE D'ÉGOUTTAGE (CSF) (ml)	40	91	372	356	72	116	136	176	193	371	98	117	180	254	153	150
GRAMMAGE (g/m ²)	47.6	48.3	48.0	48.3	48.9	48.7	48.3	47.7	47.9	46.9	48.6	48.8	48.0	47.5	48.5	48.7
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)	2.79	2.75	1.79	1.66	2.72	2.34	2.24	2.29	2.16	1.77	2.46	2.34	2.10	2.05	2.23	2.23
DENSITÉ APPARENTE (g/cm ³)	0.36	0.36	0.56	0.60	0.37	0.43	0.45	0.44	0.46	0.56	0.41	0.43	0.48	0.49	0.45	0.45
INDICE D'ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)	1.88	2.47	2.73	7.27	2.21	2.30	4.36	2.56	4.82	4.75	2.32	3.58	3.76	4.00	3.47	3.47
INDICE DE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)	4.47	8.35	9.26	11.10	6.38	7.16	9.66	8.78	10.61	10.96	7.32	9.45	9.76	9.87	9.41	9.21
RÉSISTANCE SÈCHE :																
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	3.68	4.64	4.55	8.28	4.25	4.41	6.30	4.42	6.51	6.61	4.36	5.68	5.41	5.96	4.85	5.47
ALLONGEMENT (%)	1.33	1.93	2.23	3.39	1.59	1.99	2.81	1.97	2.83	3.28	1.78	2.45	2.31	2.76	1.93	2.37
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	14	29	35	93	21	30	61	29	62	73	26	47	42	56	30	44
RÉSISTANCE HUMIDE (SICCITÉ = 30%) :																
LONGUEUR DE RUPTURE (m)	279	254	135	308	297	252	359	223	332	233	263	342	292	275	291	300
ALLONGEMENT (%)	5.9	4.7	9.0	10.7	4.9	7.5	8.9	6.8	9.2	9.1	6.4	8.4	8.9	8.5	8.2	7.6
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	3.9	3.0	2.9	7.0	3.7	4.4	7.0	3.5	7.1	4.4	4.1	6.8	5.8	5.4	5.6	5.3
BLANCHEUR MOYENNE ISO (%)	56.66	58.76	76.85	69.66	57.43	59.65	57.42	61.51	58.50	73.61	59.40	57.65	61.42	61.60	59.58	58.82
OPACITÉ MOYENNE ISO (%)	97.43	93.00	76.52	66.94	96.14	93.29	90.59	88.58	85.37	72.08	93.34	91.94	87.34	83.85	89.95	90.45
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)	73.96	59.83	36.42	25.07	67.48	54.98	45.95	48.64	40.29	31.36	57.03	50.62	42.89	39.82	47.62	48.03
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)	6.93	3.52	0.83	0.62	5.32	4.31	3.93	2.73	2.50	0.85	4.12	3.89	2.71	2.11	3.30	3.49

Tableau E.2 : Résultats de la deuxième semaine

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET OPTIQUES
SEMAINE No 3 - PLAN EXPÉRIMENTAL No 6

MÉLANGE No	6-1	6-2	6-3	6-4	6-5	6-6	6-7	6-8	6-9	6-10	6-11	6-12	6-13	6-14	6-15	6-16
COMPOSITION DU MÉLANGE																
PMM	1	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0.33	0.33	0.33	0	0.25	0.25
PTM	0	1	0	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0	0.33	0.25	0.25
PFD	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0.33	0	0.33	0.33	0.25	0.25
PKSBR_2	0	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0.33	0.25	0.25
INDICE D'ÉGOUTTAGE (CSF) (ml)	44	94	376	381	68	122	137	166	222	378	99	118	194	251	152	157
GRAMMAGE (g/m²)	60.5	60.9	60.7	60.3	60.5	60.9	59.1	61.4	59.8	61.0	60.1	60.0	58.9	60.8	60.7	60.4
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm³/g)	2.52	2.58	1.78	1.56	2.56	2.22	2.13	2.20	2.05	1.66	2.33	2.24	2.02	1.92	2.07	2.12
DENSITÉ APPARENTE (g/cm³)	0.40	0.39	0.56	0.64	0.39	0.45	0.47	0.45	0.49	0.60	0.43	0.45	0.50	0.52	0.48	0.47
INDICE D'ÉCLATEMENT (kPa·m²/g)	1.94	2.58	2.69	7.34	2.20	2.38	4.35	2.76	4.88	4.93	2.43	3.73	3.79	4.16	3.41	3.35
INDICE DE DÉCHIRURE (mN·m²/g)	4.97	8.56	10.02	11.59	6.54	7.63	10.74	9.25	11.15	11.79	7.95	9.81	10.59	11.21	10.41	10.02
RÉSISTANCE SÈCHE :																
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	3.94	4.81	4.65	9.21	4.12	4.12	6.27	4.63	5.96	6.80	4.37	5.86	5.89	5.98	4.96	5.62
ALLONGEMENT (%)	1.77	2.21	2.84	4.35	1.88	2.00	3.17	2.42	2.85	3.82	2.18	2.76	3.22	3.40	2.46	2.98
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	27	43	58	162	30	34	82	48	67	112	39	68	80	87	51	72
RÉSISTANCE HUMIDE (SICCITÉ = 30%) :																
LONGUEUR DE RUPTURE (m)	306	326	171	331	276	255	395	248	369	258	276	379	323	300	317	307
ALLONGEMENT (%)	5.5	4.2	8.1	10.5	5.3	8.0	9.0	6.4	8.8	9.6	6.2	7.8	9.1	8.5	8.4	8.6
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	5.3	4.6	3.8	9.8	4.6	6.0	9.8	5.0	9.2	6.7	5.1	8.6	8.3	7.3	7.7	7.7
BLANCHEUR MOYENNE ISO (%)	56.76	57.38	76.68	71.53	57.20	59.72	57.22	61.37	57.89	74.45	58.30	55.47	60.64	62.40	59.43	58.01
OPACITÉ MOYENNE ISO (%)	98.85	96.63	83.04	71.87	98.10	96.43	94.26	93.49	90.57	78.37	96.54	95.81	92.01	89.22	94.05	94.50
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m²/kg)	73.12	61.39	38.24	25.37	68.31	56.48	46.68	50.18	41.11	31.82	58.08	51.99	44.00	40.79	48.45	49.00
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m²/kg)	6.95	4.10	0.82	0.50	5.46	4.27	3.89	2.77	2.51	0.66	4.49	4.33	3.06	1.97	3.30	3.64

Tableau E.3 : Résultats de la troisième semaine

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET OPTIQUES
SEMAINE No 4 - PLAN EXPÉRIMENTAL No 2

MÉLANGE No	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10	2-11	2-12	2-13	2-14	2-15	2-16
COMPOSITION DU MÉLANGE																
PMM	1	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0.33	0.33	0.33	0	0.25	0.25
PTM	0	1	0	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0	0.33	0.25	0.25
PFD	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0.33	0	0.33	0.33	0.25	0.25
PKSBR_1	0	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0.33	0.25	0.25
INDICE D'ÉGOUTTAGE (CSF) (ml)	47	97	346	458	66	109	156	160	214	422	104	133	217	266	170	164
GRAMMAGE (g/m ²)	56.5	57.1	55.4	56.6	56.5	57.6	55.6	56.6	57.5	56.6	56.2	56.7	57.3	57.3	57.0	56.2
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)	2.65	2.67	1.81	1.63	2.57	2.26	2.23	2.25	2.13	1.71	2.39	2.34	2.09	2.02	2.20	2.19
DENSITÉ APPARENTE (g/cm ³)	0.38	0.38	0.55	0.61	0.39	0.44	0.45	0.44	0.47	0.58	0.42	0.43	0.48	0.49	0.46	0.46
INDICE D'ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)	1.94	2.51	2.93	6.75	2.19	2.36	4.06	2.77	4.57	4.67	2.46	3.54	3.70	4.08	3.43	3.51
INDICE DE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)	4.96	8.63	9.68	12.57	7.06	7.59	10.82	8.88	11.72	11.75	7.81	10.50	10.79	11.26	10.56	10.02
RÉSISTANCE SÈCHE :																
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	4.15	4.78	5.00	7.92	4.51	4.26	6.48	4.70	6.36	6.41	4.35	5.40	5.80	6.04	5.45	5.44
ALLONGEMENT (%)	1.77	2.20	2.95	3.54	1.99	2.14	3.19	2.60	3.48	3.22	2.14	2.68	3.00	3.43	2.96	2.95
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	27	41	60	110	33	36	81	49	89	83	36	58	72	85	66	64
RÉSISTANCE HUMIDE (SICCITÉ = 30%) :																
LONGUEUR DE RUPTURE (m)	281	319	170	285	278	244	375	245	341	240	261	366	310	281	300	302
ALLONGEMENT (%)	5.5	4.7	7.6	9.0	5.0	7.1	8.7	6.7	9.0	9.3	6.1	6.8	7.3	8.4	7.9	7.9
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	4.4	4.4	3.4	6.3	4.1	5.0	8.5	4.8	8.5	5.8	4.5	6.8	5.9	6.4	6.4	6.6
BLANCHEUR MOYENNE ISO (%)	56.47	58.32	76.29	72.10	56.63	59.82	58.42	61.78	59.86	74.43	59.23	57.80	61.44	62.62	59.87	59.38
OPACITÉ MOYENNE ISO (%)	98.66	95.82	80.89	72.48	97.72	95.65	93.13	91.97	89.46	77.14	95.58	94.68	91.38	87.87	93.16	92.84
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)	74.55	61.84	37.53	27.58	67.93	55.39	47.13	49.44	41.91	32.33	57.82	52.53	44.35	40.47	49.14	48.19
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)	7.08	3.85	0.90	0.53	5.66	4.34	3.78	2.65	2.26	0.71	4.27	4.05	2.97	1.92	3.33	3.38

Tableau E.4 : Résultats de la quatrième semaine

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET OPTIQUES
SEMAINE No 5 - PLAN EXPÉRIMENTAL No 5

MÉLANGE No	5-1	5-2	5-3	5-4	5-5	5-6	5-7	5-8	5-9	5-10	5-11	5-12	5-13	5-14	5-15	5-16
COMPOSITION DU MÉLANGE																
PMM	1	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0.33	0.33	0.33	0	0.25	0.25
PTM	0	1	0	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0	0.33	0.25	0.25
PFD	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0.33	0	0.33	0.33	0.25	0.25
PKSBR_2	0	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0.33	0.25	0.25
INDICE D'ÉGOUTTAGE (CSF) (ml)	45	96	358	370	67	110	124	154	187	364	95	112	198	227	144	137
GRAMMAGE (g/m ²)	36.5	36.4	37.3	36.0	36.7	36.4	36.1	35.6	36.2	36.9	36.0	35.5	35.8	36.6	36.0	37.2
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)	3.08	3.03	1.85	1.80	2.89	2.51	2.38	2.42	2.26	1.83	2.57	2.54	2.22	2.10	2.35	2.40
DENSITÉ APPARENTE (g/cm ³)	0.32	0.33	0.54	0.56	0.35	0.40	0.42	0.41	0.44	0.55	0.39	0.39	0.45	0.48	0.43	0.42
INDICE D'ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)	1.72	2.01	2.82	6.57	1.97	2.07	4.07	2.42	4.41	4.51	2.17	3.41	3.47	3.87	3.07	3.31
INDICE DE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)	4.11	7.12	8.07	9.86	5.64	6.46	8.61	7.50	9.96	9.73	6.56	8.34	8.77	9.20	8.29	8.61
RÉSISTANCE SÈCHE :																
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	3.90	4.01	4.67	8.46	4.23	4.28	5.86	4.45	6.22	6.31	4.14	5.17	5.49	5.35	5.16	4.99
ALLONGEMENT (%)	1.56	1.67	2.28	3.65	1.69	1.94	2.52	2.23	2.80	3.06	1.78	2.23	2.73	2.42	2.36	2.25
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	14	15	28	76	17	21	36	25	43	50	17	27	38	32	30	28
RÉSISTANCE HUMIDE (SICCITÉ = 30%) :																
LONGUEUR DE RUPTURE (m)	274	264	130	271	267	218	345	211	320	228	238	312	261	258	274	280
ALLONGEMENT (%)	5.2	4.3	6.6	11.0	4.6	5.9	8.6	5.5	7.5	8.6	5.8	8.2	8.6	7.4	7.3	7.3
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	2.6	2.2	1.7	5.0	2.3	2.3	4.8	2.1	4.2	3.3	2.5	4.4	3.7	3.2	3.3	3.5
BLANCHEUR MOYENNE ISO (%)	56.17	58.13	76.12	70.11	56.86	60.36	57.78	61.90	59.53	73.51	59.14	57.56	61.26	62.69	59.58	59.95
OPACITÉ MOYENNE ISO (%)	94.14	87.06	67.97	58.03	91.53	86.66	82.39	80.63	76.53	63.92	86.70	83.91	78.66	74.69	81.92	82.83
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)	71.17	56.67	33.28	23.91	64.02	52.79	43.22	46.69	38.45	29.25	53.83	47.62	40.52	36.93	44.96	45.44
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)	6.84	3.58	0.81	0.83	5.18	3.85	3.60	2.53	2.21	0.81	3.88	3.66	2.52	1.91	3.05	2.96

Tableau E.5 : Résultats de la cinquième semaine

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET OPTIQUES
SEMAINE No 6 - PLAN EXPÉRIMENTAL No 4

MÉLANGE No	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6	4-7	4-8	4-9	4-10	4-11	4-12	4-13	4-14	4-15	4-16
COMPOSITION DU MÉLANGE																
PMM	1	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0.33	0.33	0.33	0	0.25	0.25
PTM	0	1	0	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0	0.33	0.25	0.25
PFD	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0.33	0	0.33	0.33	0.25	0.25
PKSBR_3	0	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0.33	0.25	0.25
INDICE D'ÉGOUTTAGE (CSF) (ml)	45	94	346	235	64	114	100	169	145	280	93	93	165	208	120	121
GRAMMAGE (g/m²)	56.5	57.6	56.9	57.1	56.9	56.8	55.7	56.5	57.3	59.0	56.7	56.4	56.9	57.7	58.1	56.9
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm³/g)	2.68	2.77	1.81	1.58	2.68	2.30	2.14	2.24	1.98	1.63	2.36	2.25	2.02	1.92	2.16	2.19
DENSITÉ APPARENTE (g/cm³)	0.37	0.36	0.55	0.63	0.37	0.43	0.47	0.45	0.51	0.61	0.42	0.44	0.49	0.52	0.46	0.46
INDICE D'ÉCLATEMENT (kPa*m²/g)	2.00	2.45	2.86	7.67	2.19	2.38	4.41	2.75	4.93	5.27	2.47	3.69	3.85	4.27	3.46	3.54
INDICE DE DÉCHIRURE (mN*m²/g)	5.10	8.28	10.00	11.10	6.73	7.38	10.18	9.03	10.98	11.13	7.46	10.16	9.96	10.59	9.93	9.73
RÉSISTANCE SÈCHE :																
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	4.14	4.40	4.83	9.46	3.78	4.25	6.78	4.48	6.92	6.76	4.38	5.97	6.01	6.39	5.19	5.43
ALLONGEMENT (%)	1.78	2.03	2.83	4.25	1.46	2.14	3.31	2.42	3.18	3.48	2.01	2.80	2.87	3.27	2.43	2.80
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	26	33	57	157	19	35	88	41	88	99	33	66	69	87	50	61
RÉSISTANCE HUMIDE (SICCITÉ = 30%) :																
LONGUEUR DE RUPTURE (m)	301	321	164	380	295	250	415	243	387	258	263	377	321	329	322	325
ALLONGEMENT (%)	5.6	4.9	8.5	12.5	5.0	6.9	9.3	6.3	9.6	10.1	6.9	8.4	9.2	8.2	8.2	8.1
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	4.8	4.8	3.9	12.0	4.4	4.7	10.4	4.4	10.5	7.4	5.3	8.7	7.8	7.4	7.4	7.1
BLANCHEUR MOYENNE ISO (%)	56.33	58.32	76.06	71.81	57.30	60.05	57.36	61.66	59.06	74.23	59.22	57.97	60.91	62.46	59.66	59.59
OPACITÉ MOYENNE ISO (%)	98.85	95.98	81.69	69.29	97.72	95.45	93.10	91.79	88.67	77.08	95.66	94.45	91.16	87.63	93.27	92.97
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m²/kg)	76.87	61.81	37.81	24.00	68.92	55.67	45.80	48.81	39.81	30.68	57.67	51.93	43.58	39.48	47.98	48.19
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m²/kg)	7.44	3.99	0.88	0.53	5.45	4.23	3.95	2.65	2.27	0.68	4.23	3.90	2.99	1.90	3.27	3.34

Tableau E.6 : Résultats de la sixième semaine

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET OPTIQUES
SEMAINE No 7 - PLAN EXPÉRIMENTAL No 1

MÉLANGE No	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10	1-11	1-12	1-13	1-14	1-15	1-16
COMPOSITION DU MÉLANGE																
PMM	1	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0.33	0.33	0.33	0	0.25	0.25
PTM	0	1	0	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0	0.33	0.25	0.25
PFD	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0.33	0	0.33	0.33	0.25	0.25
PKSBR_1	0	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0.33	0.25	0.25
INDICE D'ÉGOUTTAGE (CSF) (ml)	44	91	354	474	64	111	150	154	204	425	98	127	201	259	158	171
GRAMMAGE (g/m ²)	39.5	39.5	39.1	40.9	39.4	39.5	39.6	39.1	39.4	39.8	39.2	40.1	40.1	39.6	39.7	39.8
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)	2.83	2.92	1.91	1.77	2.95	2.51	2.40	2.43	2.34	1.84	2.60	2.50	2.27	2.11	2.37	2.32
DENSITÉ APPARENTE (g/cm ³)	0.35	0.34	0.52	0.57	0.34	0.40	0.42	0.41	0.43	0.54	0.38	0.40	0.44	0.47	0.42	0.43
INDICE D'ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)	1.78	2.20	2.68	6.07	1.98	2.16	3.64	2.43	4.15	4.33	2.21	3.28	3.29	3.70	3.16	3.30
INDICE DE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)	4.31	7.41	8.53	11.39	5.73	6.74	9.78	8.26	10.38	10.48	6.89	9.19	9.59	9.70	8.89	8.71
RÉSISTANCE SÈCHE :																
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	3.44	3.77	4.50	8.06	3.59	3.96	5.42	4.17	5.82	6.37	3.88	5.27	4.89	5.67	5.10	4.79
ALLONGEMENT (%)	1.32	1.66	2.19	3.58	1.37	1.67	2.29	1.87	2.51	3.16	1.72	2.36	2.18	2.63	2.55	2.09
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	11	15	27	81	12	17	33	21	39	56	17	34	29	41	36	26
RÉSISTANCE HUMIDE (SICCITÉ = 30%) :																
LONGUEUR DE RUPTURE (m)	228	274	136	257	258	220	306	202	292	192	225	304	260	241	268	276
ALLONGEMENT (%)	5.5	4.2	7.5	8.3	4.6	6.6	9.0	6.7	8.8	9.1	6.0	7.9	8.3	7.6	7.4	7.7
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	2.4	2.4	1.9	3.6	2.4	2.8	5.0	2.6	5.0	3.4	2.7	4.6	4.0	3.3	3.8	4.2
BLANCHEUR MOYENNE ISO (%)	56.09	57.73	76.24	70.63	56.88	60.25	58.17	62.08	59.86	73.82	59.37	58.31	62.12	62.61	60.22	59.96
OPACITÉ MOYENNE ISO (%)	95.42	89.02	70.64	64.17	92.87	88.17	85.40	83.03	80.01	67.58	88.67	87.38	82.47	78.00	84.89	84.54
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)	72.32	56.70	35.01	26.91	64.71	52.13	44.92	46.85	40.37	31.19	54.53	49.92	42.34	38.59	46.66	45.52
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)	7.08	3.54	1.02	0.73	5.33	3.80	3.53	2.56	2.29	0.75	3.82	3.49	2.49	2.02	3.03	3.02

Tableau E.7 : Résultats de la septième semaine

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET OPTIQUES
SEMAINE No 8 - PLAN EXPÉRIMENTAL No 7

MÉLANGE No	7-1	7-2	7-3	7-4	7-5	7-6	7-7	7-8	7-9	7-10	7-11	7-12	7-13	7-14	7-15	7-16
COMPOSITION DU MÉLANGE																
PMM	1	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0.33	0.33	0.33	0	0.25	0.25
PTM	0	1	0	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0	0.33	0.25	0.25
PFD	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0.33	0	0.33	0.33	0.25	0.25
PKSBR_0	0	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0.33	0.25	0.25
INDICE D'ÉGOUTTAGE (CSF) (ml)	41	91	350	521	63	107	153	149	224	433	89	128	205	249	165	158
GRAMMAGE (g/m²)	48.3	48.8	48.2	47.6	48.8	48.2	48.4	47.4	46.8	48.2	48.7	48.5	48.2	47.2	47.7	47.7
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm³/g)	2.76	2.92	1.86	1.73	2.82	2.35	2.31	2.37	2.30	1.85	2.54	2.47	2.16	2.11	2.32	2.30
DENSITÉ APPARENTE (g/cm³)	0.36	0.34	0.54	0.58	0.36	0.42	0.43	0.42	0.43	0.54	0.39	0.41	0.46	0.47	0.43	0.43
INDICE D'ÉCLATEMENT (kPa·m²/g)	1.76	2.33	2.83	6.13	2.05	2.32	3.74	2.55	4.07	4.27	2.26	3.36	3.46	3.64	3.16	3.17
INDICE DE DÉCHIRURE (mN·m²/g)	4.62	7.80	9.44	11.90	6.20	7.25	10.61	8.43	11.28	11.23	7.45	9.70	10.06	10.34	9.66	9.47
RÉSISTANCE SÈCHE :																
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	3.81	4.18	4.75	7.20	4.29	4.30	5.91	4.20	5.61	5.97	3.97	5.32	5.52	5.68	5.34	5.04
ALLONGEMENT (%)	1.65	1.86	2.52	3.16	1.87	1.97	3.09	2.04	2.79	2.52	1.77	2.54	3.09	3.09	2.61	2.50
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	19	25	41	73	25	28	62	27	50	49	22	45	59	59	47	41
RÉSISTANCE HUMIDE (SICCITÉ = 30%) :																
LONGUEUR DE RUPTURE (m)	254	305	163	236	282	232	323	227	301	172	244	334	277	248	277	284
ALLONGEMENT (%)	5.4	4.5	7.5	8.8	5.1	7.1	9.0	6.5	8.1	8.4	6.1	7.9	8.4	8.1	8.2	7.7
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	3.4	3.8	2.8	4.4	3.7	3.7	6.6	3.5	5.5	3.8	3.7	6.3	5.0	4.5	5.3	5.1
BLANCHEUR MOYENNE ISO (%)	56.38	56.96	76.58	70.34	57.18	60.86	58.97	61.07	60.89	73.44	59.74	58.05	61.34	63.40	60.36	59.49
OPACITÉ MOYENNE ISO (%)	97.60	93.88	77.11	68.64	96.22	92.76	90.48	88.22	84.69	73.35	93.32	91.83	87.58	82.96	89.24	89.47
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m²/kg)	73.98	59.99	36.72	27.70	67.64	55.23	47.52	48.06	42.53	31.98	57.24	51.60	43.58	40.23	47.76	47.62
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m²/kg)	7.05	4.09	0.83	0.63	5.53	3.95	3.51	2.74	2.14	0.83	3.90	3.71	2.70	1.91	3.14	3.15

Tableau E.8 : Résultats de la huitième semaine

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET OPTIQUES
SEMAINE No 9 - PLAN EXPÉRIMENTAL No 3

MÉLANGE No	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9	3-10	3-11	3-12	3-13	3-14	3-15	3-16
COMPOSITION DU MÉLANGE																
PMM	1	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0.33	0.33	0.33	0	0.25	0.25
PTM	0	1	0	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0	0.33	0.25	0.25
PFD	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0.33	0	0.33	0.33	0.25	0.25
PKSBR_3	0	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0	0.33	0.33	0.33	0.25	0.25
INDICE D'ÉGOUTTAGE (CSF) (ml)	42	95	345	246	58	103	103	147	136	283	98	98	158	180	130	125
GRAMMAGE (g/m ²)	39.7	39.1	39.4	39.9	39.9	39.1	39.1	39.0	39.9	39.7	39.8	38.8	39.2	40.0	39.3	38.4
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)	2.94	2.96	1.87	1.74	3.03	2.52	2.36	2.42	2.24	1.78	2.65	2.47	2.25	2.15	2.30	2.37
DENSITÉ APPARENTE (g/cm ³)	0.34	0.34	0.54	0.57	0.33	0.40	0.42	0.41	0.45	0.56	0.38	0.40	0.44	0.47	0.43	0.42
INDICE D'ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)	1.64	2.11	2.72	7.14	1.90	2.03	4.04	2.44	4.51	4.76	2.14	3.47	3.58	3.75	3.33	3.20
INDICE DE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)	4.26	7.02	8.19	9.82	5.91	6.47	9.45	7.90	9.67	9.85	6.74	8.55	8.65	9.45	8.46	8.45
RÉSISTANCE SÈCHE :																
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	3.30	4.10	4.86	9.15	3.31	4.15	5.59	3.93	6.54	7.10	3.70	5.40	5.39	5.92	4.92	5.43
ALLONGEMENT (%)	1.31	1.70	2.58	4.07	1.35	1.99	2.40	1.74	3.12	3.39	1.68	2.43	2.44	2.90	2.17	2.64
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	10	17	36	100	11	22	35	17	56	67	16	34	35	48	28	39
RÉSISTANCE HUMIDE (SICCITÉ = 30%) :																
LONGUEUR DE RUPTURE (m)	215	233	143	316	239	181	321	166	288	233	200	297	244	226	250	246
ALLONGEMENT (%)	5.3	4.3	6.6	12.0	4.8	6.4	9.7	6.5	9.0	9.5	6.2	7.9	8.4	8.4	7.5	7.8
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	2.2	2.0	1.7	6.3	2.4	2.0	5.6	2.0	4.7	3.6	2.4	4.5	3.7	3.6	3.5	3.5
BLANCHEUR MOYENNE ISO (%)	56.70	58.25	76.43	70.31	57.39	60.90	57.98	62.56	60.13	73.63	59.85	57.93	62.31	63.73	60.42	60.57
OPACITÉ MOYENNE ISO (%)	95.36	88.59	70.54	60.15	93.07	88.07	84.07	82.95	78.79	65.77	89.10	85.65	81.14	77.18	83.61	83.49
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)	72.38	56.77	34.53	23.59	65.44	52.93	42.75	47.17	38.33	28.75	55.29	47.13	41.03	37.72	44.83	45.52
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)	6.81	3.58	1.02	0.75	5.27	3.84	3.33	2.31	2.00	0.76	3.77	3.61	2.55	1.75	2.80	2.86

Tableau E.9 : Résultats de la neuvième semaine

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET OPTIQUES

SEMAINE No 10 - PÂTES VIERGES

Tableau E.10 : Résultats de la dixième semaine (pâtes vierges)

PÂTE	PMM	PTM	PFD	PKSBR	PKSBR_0	PKSBR_1	PKSBR_2	PKSBR_3	PKSBR_4
ÉNEGIE SPÉCIFIQUE TOTALE (kWh/TMSA)				-	257	357	601	845	945
INDICE D'ÉGOUTTAGE (CSF) (ml)	47	93	332	640	496	440	355	246	186
GRAMMAGE (g/m²)	60.3	59.8	60.9	60.2	58.7	60.4	62.1	59.2	60.3
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm³/g)	2.66	2.74	1.81	1.85	1.65	1.61	1.54	1.54	1.52
DENSITÉ APPARENTE (g/cm³)	0.38	0.36	0.55	0.54	0.61	0.62	0.65	0.65	0.66
INDICE D'ÉCLATEMENT (kPa*m²/g)	1.82	2.25	2.77	3.91	6.47	6.67	7.24	7.74	7.64
INDICE DE DÉCHIRURE (mN*m²/g)	5.16	8.99	9.92	17.00	12.45	12.86	11.40	11.12	10.39
RÉSISTANCE SÈCHE :									
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	3.12	4.13	4.56	5.29	7.82	8.15	8.64	8.28	8.19
ALLONGEMENT (%)	1.28	1.92	2.68	2.81	3.78	3.57	3.67	3.36	3.24
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	14	30	53	61	117	116	132	110	103
RÉSISTANCE HUMIDE (SICCITÉ = 30%) :									
LONGUEUR DE RUPTURE (m)	262	318	145	198	294	296	341	384	421
ALLONGEMENT (%)	5.0	4.2	8.2	6.1	7.5	7.9	9.7	10.6	11.8
ÉNERGIE ABSORBÉE (TEA) (g/cm)	3.7	4.2	3.6	3.3	5.0	6.2	8.7	10.5	13.1
BLANCHEUR MOYENNE ISO (%)	54.81	57.72	74.63	73.28	70.70	70.53	68.40	70.33	66.24
OPACITÉ MOYENNE ISO (%)	98.77	96.11	83.42	78.83	74.95	74.35	73.55	70.25	71.01
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m²/kg)	69.44	60.05	37.45	35.24	29.14	27.31	25.12	23.83	22.39
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m²/kg)	7.13	3.85	0.99	0.50	0.51	0.50	0.64	0.51	0.66
FRACTIONS BAUER-McNETT (%)									
R14	2.8	6.9	5.4	51.9	47.0	47.8	47.1	48.3	42.6
R28	14.4	25.6	20.5	26.8	29.7	29.0	28.2	25.5	30.1
R48	17.9	17.2	31.0	12.4	12.3	12.3	12.2	11.7	13.0
R100	15.8	14.4	24.3	5.9	5.9	5.9	5.7	5.4	6.8
R200	11.0	6.9	7.4	1.8	2.0	2.0	2.0	2.9	2.7
P200	38.2	29.2	11.5	1.2	3.1	3.2	4.9	6.2	5.0
LONGUEUR MOYENNE DES FIBRES (mm)	0.82	1.11	1.17	2.32	2.23	2.24	2.21	2.19	2.12

ANNEXE F

TABLES D'ANOVA DES MODÈLES DES 9 PROPRIÉTÉS PAPETIÈRES ANALYSÉES

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	$F_{\text{calculé}}$ (F_{critique})
Linéaire $R^2 = 0.9714$ $R_A^2 = 0.9706$	Régression	4	5.781×10^6	1.445×10^6	1 187
	Erreur totale	140	1.705×10^5	1.218×10^3	(2.37)
	Manque d'ajustement	43	1.647×10^5	3.831×10^3	65
	Erreur pure	97	5.744×10^3	5.922×10^1	(1.55)
Quadratique $R^2 = 0.9981$ $R_A^2 = 0.9979$	Régression	12	5.941×10^6	4.951×10^5	5 922
	Erreur totale	132	1.104×10^4	8.360×10^1	(1.75)
	Manque d'ajustement	35	5.291×10^3	1.512×10^2	2.55
	Erreur pure	97	5.744×10^3	5.922×10^1	(1.40)
	Totale	144	5.952×10^6		

Tableau F.1 : ANOVA pour l'indice d'égouttage

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	F _{calculé} (F _{critique})
Linéaire R ² = 0.9985 R _A ² = 0.9984	Régression	9	4.665×10 ⁶	5.183×10 ⁵	9 949
	Erreur totale	135	7.033×10 ³	5.210×10 ¹	(1.88)
	Manque d'ajustement	98	6.614×10 ³	6.749×10 ¹	5.96
	Erreur pure	37	4.189×10 ²	1.132×10 ¹	(1.60)
Quadratique R ² = 0.9993 R _A ² = 0.9992	Régression	14	4.668×10 ⁶	3.334×10 ⁵	12 768
	Erreur totale	130	3.395×10 ³	2.612×10 ¹	(1.70)
	Manque d'ajustement	93	2.976×10 ³	3.200×10 ¹	2.83
	Erreur pure	37	4.189×10 ²	1.132×10 ¹	(1.60)
	Totale	144	4.672×10 ⁶		

Tableau F.2 : ANOVA pour l'indice d'éclatement

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	F _{calculé} (F _{critique})
Linéaire R ² = 0.9949 R _A ² = 0.9946	Régression	9	2.899×10 ⁷	3.221×10 ⁶	2 935
	Erreur totale	135	1.481×10 ⁵	1.097×10 ³	(1.88)
	Manque d'ajustement	98	1.437×10 ⁵	1.466×10 ³	12.1
	Erreur pure	37	4.490×10 ³	1.213×10 ²	(1.60)
Quadratique R ² = 0.9993 R _A ² = 0.9992	Régression	18	2.912×10 ⁷	1.618×10 ⁶	9 642
	Erreur totale	126	2.114×10 ⁴	1.678×10 ²	(1.61)
	Manque d'ajustement	89	1.665×10 ⁴	1.871×10 ²	1.54
	Erreur pure	37	4.490×10 ³	1.213×10 ²	(1.60)
	Totale	144	2.914×10 ⁷		

Tableau F.3 : ANOVA pour l'indice de déchirure

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	$F_{\text{calculé}}$ (F_{critique})
Linéaire $R^2 = 0.9977$ $R_A^2 = 0.9975$	Régression	9	1.024×10^7	1.138×10^6	6 542
	Erreur totale	135	2.349×10^4	1.740×10^2	(1.88)
	Manque d'ajustement	98	1.892×10^4	1.930×10^2	1.56
	Erreur pure	37	4.567×10^3	1.234×10^2	(1.60)
Quadratique $R^2 = 0.9981$ $R_A^2 = 0.9979$	Régression	12	1.023×10^7	8.540×10^5	5 756
	Erreur totale	132	1.958×10^4	1.484×10^2	(1.75)
	Manque d'ajustement	95	1.502×10^4	1.581×10^2	1.28
	Erreur pure	37	4.567×10^3	1.234×10^2	(1.60)
	Totale	144	1.027×10^7		

Tableau F.4 : ANOVA pour la longueur de rupture

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	$F_{\text{calculé}}$ (F_{critique})
Linéaire $R^2 = 0.9808$ $R_A^2 = 0.9795$	Régression	9	4.052×10^5	4.502×10^4	766
	Erreur totale	135	7.935×10^3	5.877×10^1	(1.88)
	Manque d'ajustement	98	7.022×10^3	7.165×10^1	2.9
	Erreur pure	37	9.135×10^2	2.469×10^1	(1.60)
Quadratique $R^2 = 0.9876$ $R_A^2 = 0.9863$	Régression	14	4.080×10^5	2.915×10^4	740
	Erreur totale	130	5.118×10^3	3.937×10^1	(1.70)
	Manque d'ajustement	93	4.205×10^3	4.521×10^1	1.83
	Erreur pure	37	9.135×10^2	2.469×10^1	(1.60)
	Totale	144	4.132×10^5		

Tableau F.5 : ANOVA pour le TEA

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	F _{calculé} (F _{critique})
Linéaire R ² = 0.9916 R _A ² = 0.9910	Régression	9	2.851×10 ¹⁰	3.167×10 ⁹	1 761
	Erreur totale	135	2.428×10 ⁸	1.798×10 ⁶	(1.88)
	Manque d'ajustement	98	2.294×10 ⁸	2.341×10 ⁶	6.48
	Erreur pure	37	1.336×10 ⁷	3.610×10 ⁵	(1.60)
Quadratique R ² = 0.9973 R _A ² = 0.9969	Régression	17	2.867×10 ¹⁰	1.687×10 ⁹	2 778
	Erreur totale	127	7.711×10 ⁷	6.072×10 ⁵	(1.63)
	Manque d'ajustement	90	6.375×10 ⁷	7.083×10 ⁵	1.96
	Erreur pure	37	1.336×10 ⁷	3.610×10 ⁵	(1.60)
	Totale	144	2.875×10 ¹⁰		

Tableau F.6 : ANOVA pour la longueur de rupture humide (30%)

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	F _{calculé} (F _{critique})
Linéaire R ² = 0.9790 R _A ² = 0.9776	Régression	9	4.089×10 ³	4.544×10 ²	698
	Erreur totale	135	8.788×10 ¹	6.510×10 ⁻¹	(1.88)
	Manque d'ajustement	98	8.509×10 ¹	8.683×10 ⁻¹	11.5
	Erreur pure	37	2.790×10 ⁰	7.540×10 ⁻²	(1.60)
Quadratique R ² = 0.9969 R _A ² = 0.9963	Régression	22	4.164×10 ³	1.893×10 ²	1 758
	Erreur totale	122	1.313×10 ¹	1.077×10 ⁻¹	(1.55)
	Manque d'ajustement	85	1.034×10 ¹	1.217×10 ⁻¹	1.61
	Erreur pure	37	2.790×10 ⁰	7.540×10 ⁻²	(1.60)
	Totale	144	4.177×10 ³		

Tableau F.7 : ANOVA pour le TEA humide

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	F _{calculé} (F _{critique})
Linéaire R ² = 0.9989 R _A ² = 0.9988	Régression	8	1.087×10 ⁶	1.359×10 ⁵	14 856
	Erreur totale	136	1.244×10 ³	9.148×10 ⁰	(1.94)
	Manque d'ajustement	99	1.241×10 ³	1.254×10 ¹	160
	Erreur pure	37	2.896×10 ⁰	7.827×10 ⁻²	(1.60)
Quadratique R ² = 1.0000 R _A ² = 1.0000	Régression	26	1.088×10 ⁶	4.186×10 ⁴	124 059
	Erreur totale	118	3.982×10 ¹	3.374×10 ⁻¹	(1.59)
	Manque d'ajustement	81	3.692×10 ¹	4.559×10 ⁻¹	5.82
	Erreur pure	37	2.896×10 ⁰	7.827×10 ⁻²	(1.60)
	Totale	144	1.088×10 ⁶		

Tableau F.8 : ANOVA pour l'opacité

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	F _{calculé} (F _{critique})
Linéaire R ² = 0.9981 R _A ² = 0.9981	Régression	4	5.573×10 ⁵	1.393×10 ⁵	18 460
	Erreur totale	140	1.057×10 ³	7.548×10 ⁰	(2.37)
	Manque d'ajustement	103	1.050×10 ³	1.020×10 ¹	57
	Erreur pure	37	6.593×10 ⁰	1.782×10 ⁻¹	(1.60)
Quadratique R ² = 0.9999 R _A ² = 0.9999	Régression	13	5.583×10 ⁵	4.295×10 ⁴	84 603
	Erreur totale	131	6.650×10 ¹	5.076×10 ⁻¹	(1.72)
	Manque d'ajustement	94	5.991×10 ¹	6.373×10 ⁻¹	3.58
	Erreur pure	37	6.593×10 ⁰	1.782×10 ⁻¹	(1.60)
	Totale	144	5.584×10 ⁵		

Tableau F.9 : ANOVA pour la blancheur

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X_3	357.5	2.8	1.408×10^6	16 839
X_4	371.2	3.7	8.374×10^5	10 017
$X_4 Z_2$	-117.2	2.9	1.409×10^5	1 685
X_2	91	2.8	9.116×10^4	1 090
$X_1 X_3$	-353.8	12.9	6.286×10^4	752
$X_1 X_4$	-291.1	12.9	4.254×10^4	509
$X_2 X_3$	-243.1	12.9	2.968×10^4	355
X_1	42.7	2.8	2.007×10^4	240
$X_2 X_4$	-150.6	12.9	1.139×10^4	136
$X_1 X_4 Z_2$	137.7	12.2	1.061×10^4	127
$X_2 X_4 Z_2$	105.6	12.2	6.247×10^3	75
$X_4 Z_2^2$	-12.1	2.8	1.558×10^3	19

Tableau F.10 : ANOVA pour les paramètres de l'indice d'égouttage

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X_4	341.3	2	7.892×10^5	30 219
X_3	132.2	1.2	2.957×10^5	11 323
X_2	114.7	1.2	2.225×10^5	8 520
X_1	88.9	1.4	1.070×10^5	4 096
$X_4 Z_1$	72.1	1.5	6.235×10^4	2 388
$X_2 Z_1$	28.2	1.3	1.189×10^4	455
$X_3 Z_1$	26.9	1.3	1.087×10^4	416
$X_4 Z_2$	27.3	1.4	9.828×10^3	376
$X_1 Z_1$	20.4	1.5	4.975×10^3	191
$X_1 X_4$	-67.1	7.2	2.270×10^3	87
$X_1 X_4 Z_2$	-29.2	6.8	4.803×10^2	18
$X_4 Z_2^2$	-5.6	1.6	3.329×10^2	13
$X_1 X_4 Z_1$	-26.2	7.6	3.075×10^2	12
$X_4 Z_1 Z_2$	5.3	1.7	2.474×10^2	9.5

Tableau F.11 : ANOVA pour les paramètres de l'indice d'éclatement

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X_4	538.7	4.3	2.687×10^6	16 015
X_3	446.1	3.9	2.199×10^6	13 106
X_2	387.9	3.5	2.013×10^6	11 999
X_1	224.1	3.9	5.550×10^5	3 308
X_3Z_1	110.2	3.7	1.450×10^5	864
X_4Z_1	120.4	4.5	1.191×10^5	710
X_2Z_1	95.8	3.7	1.096×10^5	653
X_1X_4	407.5	18.3	8.331×10^4	497
X_1Z_1	54.9	3.7	3.603×10^4	215
X_3X_4	184.8	18.3	1.713×10^4	102
X_4Z_2	-35.6	3.6	1.665×10^4	99
X_2X_4	167.1	25	7.510×10^3	45
$X_1X_4Z_1$	100.9	19.4	4.534×10^3	27
$X_3X_4Z_1$	63.6	19.4	1.800×10^3	11
X_1X_3	58.2	18.3	1.698×10^3	10
$X_2X_4Z_1$	58.2	19.4	1.507×10^3	9
$X_2X_4Z_1^2$	55.5	19.2	1.400×10^3	8.4
$X_3X_4Z_2$	46.5	17.3	1.214×10^3	7.2

Tableau F.12 : ANOVA pour les paramètres de l'indice déchirure

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X_4	410.1	3.2	2.862×10^6	16 452
X_3	224.6	3.2	8.579×10^5	4 932
X_2	207.6	3.2	7.333×10^5	4 215
X_1	181.2	3.2	5.586×10^5	3 211
X_4Z_1	81.3	3.4	9.966×10^4	573
X_2Z_1	49	3.4	3.614×10^4	208
X_3Z_1	42.5	3.4	2.728×10^4	157
X_1Z_1	41.5	3.4	2.595×10^4	149
X_4Z_2	24.9	3.1	1.086×10^4	62

Tableau F.13 : ANOVA pour les paramètres de la longueur de rupture

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X_4	93.5	2.3	6.566×10^4	1 668
X_3	40.7	1.5	2.803×10^4	712
X_2	26.3	1.6	1.030×10^4	262
X_4Z_1	25.7	1.8	7.919×10^3	201
X_1	16.3	1.6	3.961×10^3	101
X_3Z_1	12.1	1.6	2.185×10^3	56
$X_4Z_1^2$	15.1	2.2	1.823×10^3	46
X_4Z_2	11.7	1.7	1.784×10^3	45
X_2Z_1	8.9	1.6	1.189×10^3	30
$X_1X_4Z_2$	-38.1	8.4	8.142×10^2	21
$X_2X_4Z_1^2$	-18.5	7.3	2.518×10^2	6.4
X_1Z_1	4.6	1.8	2.496×10^2	6.3
$X_1X_4Z_1^2$	-16.9	7.3	2.109×10^2	5.4
$X_1X_4Z_1$	20	9.4	1.786×10^2	4.5

Tableau F.14 : ANOVA pour les paramètres du TEA

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X_2	1.407×10^4	2.127×10^2	2.655×10^9	4 372
X_4	1.534×10^4	2.343×10^2	2.601×10^9	4 285
X_1	1.303×10^4	2.343×10^2	1.876×10^9	3 091
X_3	7.589×10^3	2.127×10^2	7.728×10^8	1 273
$X_2 Z_1$	3.918×10^3	2.486×10^2	1.509×10^8	248
$X_4 Z_1$	3.625×10^3	2.486×10^2	1.291×10^8	213
$X_1 Z_1$	3.481×10^3	2.486×10^2	1.191×10^8	196
$X_1 X_4$	1.411×10^4	1.099×10^3	1.001×10^8	165
$X_4 Z_2$	2.636×10^3	2.149×10^2	9.138×10^7	151
$X_3 Z_1$	2.126×10^3	2.025×10^2	6.695×10^7	110
$X_2 X_4$	8.131×10^3	1.099×10^3	3.324×10^7	55
$X_1 X_3$	4.941×10^3	1.099×10^3	1.227×10^7	20
$X_4 Z_1 Z_2$	1.027×10^3	2.626×10^2	9.285×10^6	15
$X_1 X_4 Z_1$	3.992×10^3	1.168×10^3	7.099×10^6	12
$X_1 X_2 Z_1$	-2.754×10^3	1.168×10^3	3.379×10^6	5.6
$X_1 X_4 Z_2$	-2.243×10^3	1.040×10^3	2.824×10^6	4.7
$X_2 X_4 Z_1$	2.475×10^3	1.168×10^3	2.727×10^6	4.5

Tableau F.15 : ANOVA pour les paramètres de la longueur de rupture humide

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X_4	7.08	0.13	3.047×10^2	2 830
X_1	3.64	0.1	1.462×10^2	1 358
X_2	3.36	0.1	1.244×10^2	1 155
X_3	2.78	0.1	7.745×10^1	719
$X_4 Z_2$	2.35	0.11	4.556×10^1	423
$X_4 Z_1$	1.91	0.1	3.570×10^1	332
$X_1 X_4$	7.85	0.46	3.088×10^1	287
$X_2 X_4$	6.69	0.46	2.248×10^1	209
$X_2 Z_1$	1.02	0.1	1.227×10^1	114
$X_3 Z_1$	0.9	0.1	9.540×10^0	89
$X_1 Z_1$	0.96	0.1	9.099×10^0	85
$X_4 Z_1 Z_2$	0.89	0.11	6.908×10^0	64
$X_1 X_3$	2.66	0.46	3.560×10^0	33
$X_3 X_4 Z_2$	-2.23	0.44	2.770×10^0	26
$X_2 X_4 Z_1$	2.23	0.49	2.215×10^0	21
$X_2 X_4 Z_2$	-1.93	0.44	2.075×10^0	19
$X_1 X_4 Z_2$	-1.77	0.44	1.741×10^0	16
$X_2 X_3$	1.7	0.46	1.456×10^0	14
$X_1 X_4 Z_1$	1.7	0.49	1.292×10^0	12
$X_4 Z_2 Z_2$	0.3	0.11	8.044×10^{-1}	7.5
$X_1 X_3 Z_1$	1.29	0.49	7.440×10^{-1}	6.9
$X_3 X_4 Z_2^2$	-0.88	0.38	5.700×10^{-1}	5.3

Tableau F.16 : ANOVA pour les paramètres du TEA humide

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X_2	93.1	0.3	4.451×10^4	131 904
X_1	97.5	0.3	4.399×10^4	130 374
X_3	76.7	0.3	3.021×10^4	89 530
X_4	66.6	0.3	2.052×10^4	60 802
$X_3 Z_1$	5.5	0.2	4.572×10^2	1 355
$X_1 X_3$	24.1	0.8	2.907×10^2	862
$X_1 X_4$	34.6	1.3	2.448×10^2	726
$X_2 X_4$	21.5	0.8	2.317×10^2	687
$X_4 Z_1$	4.7	0.2	2.185×10^2	648
$X_2 Z_1$	3.4	0.2	1.391×10^2	412
$X_2 X_3$	14.8	0.8	1.103×10^2	327
$X_1 Z_1$	1.6	0.2	3.132×10^1	93
$X_4 Z_2$	-1.8	0.2	2.555×10^1	76
$X_3 X_4$	6	0.8	1.772×10^1	53
$X_1 X_4 Z_1$	4.7	0.9	9.696×10^0	29
$X_2 X_4 Z_1$	3.7	0.9	6.172×10^0	18
$X_3 Z_1^2$	-0.8	0.2	5.513×10^0	16
$X_1 X_2$	3.1	0.8	4.829×10^0	14
$X_2 Z_1^2$	-0.7	0.2	4.636×10^0	14
$X_4 Z_1^2$	-0.7	0.2	3.282×10^0	9.7
$X_2 X_4 Z_2$	2.4	0.8	3.185×10^0	9.4
$X_1 X_4 Z_2$	2.3	0.8	2.932×10^0	8.7
$X_1 Z_1^2$	-0.6	0.2	2.577×10^0	7.6
$X_4 Z_1 Z_2$	0.5	0.2	2.066×10^0	6.1
$X_3 X_4 Z_2$	1.8	0.8	1.727×10^0	5.1
$X_1 X_4 Z_1^2$	-2.3	1.1	1.449×10^0	4.3

Tableau F.17 : ANOVA pour les paramètres de l'opacité

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X_3	76.4	0.2	6.423×10^4	126 524
X_4	70.7	0.2	5.497×10^4	108 288
X_2	57.9	0.2	3.103×10^4	61 124
X_1	56.4	0.2	2.938×10^4	57 882
X_1X_3	-24.8	1	3.093×10^2	609
X_1X_4	-23.1	1	2.676×10^2	527
X_2X_3	-21.2	1	2.253×10^2	444
X_2X_4	-22.2	1.4	1.320×10^2	260
X_1X_2	2.8	1	3.973×10^0	7.8
$X_2X_4Z_1$	-2.2	0.8	3.574×10^0	7
$X_1X_4Z_2$	-2.0	0.8	3.070×10^0	6.1
$X_2X_4Z_2^2$	2.5	1.1	2.738×10^0	5.4
$X_1X_3Z_1$	-1.7	0.8	2.220×10^0	4.4

Tableau F.18 : ANOVA pour les paramètres de la blancheur

ANNEXE G

TABLES D'ANOVA DES MODÈLES DES AUTRES PROPRIÉTÉS PAPETIÈRES

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	$F_{\text{calculé}}$ (F_{critique})
Linéaire $R^2 = 0.9995$ $R_A^2 = 0.9995$	Régression	9	1.769×10^6	1.965×10^5	29 000
	Erreur totale	135	9.149×10^2	6.777×10^0	(1.88)
	Manque d'ajustement	98	6.915×10^2	7.056×10^0	1.17
	Erreur pure	37	2.234×10^2	6.038×10^0	(1.60)
Quadratique $R^2 = 0.9997$ $R_A^2 = 0.9997$	Régression	15	1.769×10^6	1.179×10^5	28 893
	Erreur totale	129	5.266×10^2	4.082×10^0	(1.67)
	Manque d'ajustement	92	3.032×10^2	3.296×10^0	0.55
	Erreur pure	37	2.234×10^2	6.038×10^0	(1.60)
	Totale	144	1.770×10^6		

Tableau G.1 : ANOVA pour le volume spécifique

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	F _{calculé} (F _{critique})
Linéaire R ² = 0.9988 R _A ² = 0.9872	Régression	9	1.373×10 ⁻²	1.153×10 ⁻³	12 065
	Erreur totale	135	1.707×10 ⁻⁵	1.264×10 ⁻⁷	(1.88)
	Manque d'ajustement	98	1.594×10 ⁻⁵	1.627×10 ⁻⁷	5.33
	Erreur pure	37	1.130×10 ⁻⁶	3.054×10 ⁻⁸	(1.60)
Quadratique R ² = 0.9997 R _A ² = 0.9997	Régression	20	1.374×10 ⁻²	6.870×10 ⁻⁴	23 598
	Erreur totale	124	3.610×10 ⁻⁶	2.911×10 ⁻⁸	(1.57)
	Manque d'ajustement	87	2.480×10 ⁻⁶	2.851×10 ⁻⁸	0.93
	Erreur pure	37	1.130×10 ⁻⁶	3.054×10 ⁻⁸	(1.60)
	Totale	144	1.375×10 ⁻²		

Tableau G.2 : ANOVA pour la densité apparente

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	F _{calculé} (F _{critique})
Linéaire R ² = 0.9910 R _A ² = 0.9905	Régression	8	920.7	115.1	1 868
	Erreur totale	136	8.38	0.062	(1.94)
	Manque d'ajustement	99	7.103	0.072	2.08
	Erreur pure	37	1.277	0.035	(1.60)
Quadratique R ² = 0.9945 R _A ² = 0.9938	Régression	16	924.0	57.75	1 451
	Erreur totale	128	5.093	0.040	(1.65)
	Manque d'ajustement	91	3.816	0.042	1.22
	Erreur pure	37	1.277	0.035	(1.60)
	Totale	144	929.1		

Tableau G.3 : ANOVA pour l'allongement à la rupture

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	F _{calculé} (F _{critique})
Linéaire $R^2 = 0.9946$ $R_A^2 = 0.9944$	Régression	6	8.571×10^3	1.429×10^3	4 258
	Erreur totale	138	4.630×10^1	3.355×10^{-1}	(2.10)
	Manque d'ajustement	101	4.231×10^1	4.189×10^{-1}	3.88
	Erreur pure	37	3.994×10^0	1.080×10^{-1}	(1.60)
Quadratique $R^2 = 0.9981$ $R_A^2 = 0.9979$	Régression	15	8.601×10^3	5.734×10^2	4 404
	Erreur totale	129	1.680×10^1	1.302×10^{-1}	(1.67)
	Manque d'ajustement	92	1.281×10^1	1.392×10^{-1}	1.29
	Erreur pure	37	3.994×10^0	1.080×10^{-1}	(1.60)
	Totale	144	8.618×10^3		

Tableau G.4 : ANOVA pour l'allongement à la rupture humide

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	F _{calculé} (F _{critique})
Linéaire $R^2 = 0.9994$ $R_A^2 = 0.9994$	Régression	8	3.492×10^5	4.365×10^4	29 096
	Erreur totale	136	2.040×10^2	1.500×10^0	(1.94)
	Manque d'ajustement	99	1.948×10^2	1.967×10^0	7.89
	Erreur pure	37	9.230×10^0	2.495×10^{-1}	(1.60)
Quadratique $R^2 = 0.9999$ $R_A^2 = 0.9999$	Régression	17	3.494×10^5	2.055×10^4	76 788
	Erreur totale	127	3.399×10^1	2.676×10^{-1}	(1.63)
	Manque d'ajustement	90	2.476×10^1	2.751×10^{-1}	1.10
	Erreur pure	37	9.230×10^0	2.495×10^{-1}	(1.60)
	Totale	144	3.494×10^5		

Tableau G.5 : ANOVA pour le coefficient de diffusion

Forme du modèle	Source de variation	DL	SC	MC	F _{calculé} (F _{critique})
Linéaire R ² = 0.9979 R _A ² = 0.9978	Régression	6	1.798×10 ³	2.996×10 ²	10 861
	Erreur totale	138	3.807×10 ⁰	2.760×10 ⁻²	(2.10)
	Manque d'ajustement	101	3.113×10 ⁰	3.080×10 ⁻²	1.64
	Erreur pure	37	6.937×10 ⁻¹	1.870×10 ⁻²	(1.60)
Quadratique R ² = 0.9988 R _A ² = 0.9987	Régression	13	1.800×10 ³	1.384×10 ²	8 749
	Erreur totale	131	2.073×10 ⁰	1.580×10 ⁻²	(1.72)
	Manque d'ajustement	94	1.379×10 ⁰	1.470×10 ⁻²	0.783
	Erreur pure	37	6.937×10 ⁻¹	1.870×10 ⁻²	(1.60)
	Totale	144	1.802×10 ³		

Tableau G.6 : ANOVA pour le coefficient d'absorption

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X ₁	134.5	0.63	3.077×10 ⁵	45 398
X ₂	133	0.63	3.010×10 ⁵	44 408
X ₃	89.5	0.63	1.364×10 ⁵	20 123
X ₄	79.2	0.63	1.068×10 ⁵	15 753
X ₂ Z ₁	18.2	0.67	5.021×10 ³	741
X ₁ Z ₁	16.4	0.67	4.061×10 ³	599
X ₃ Z ₁	14.2	0.67	3.057×10 ³	451
X ₄ Z ₁	10.7	0.67	1.722×10 ³	254
X ₄ Z ₂	-2.9	0.62	1.489×10 ²	22

Tableau G.7 : ANOVA pour les paramètres du volume spécifique

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X_4	1.241×10^{-2}	7.303×10^{-5}	8.419×10^{-4}	28 892
X_3	1.126×10^{-2}	7.179×10^{-5}	7.171×10^{-4}	24 609
X_1	7.516×10^{-3}	7.303×10^{-5}	3.086×10^{-4}	10 592
X_2	7.328×10^{-3}	7.179×10^{-5}	3.036×10^{-4}	10 420
$X_4 Z_1$	-1.668×10^{-3}	4.408×10^{-5}	4.171×10^{-5}	1 431
$X_3 Z_1$	-1.846×10^{-3}	4.927×10^{-5}	4.091×10^{-5}	1 404
$X_2 Z_1$	-1.047×10^{-3}	4.408×10^{-5}	1.643×10^{-5}	564
$X_1 Z_1$	-9.333×10^{-4}	4.927×10^{-5}	1.046×10^{-5}	359
$X_1 X_3$	-2.616×10^{-3}	2.410×10^{-4}	3.430×10^{-6}	118
$X_4 Z_2$	3.237×10^{-4}	4.073×10^{-5}	1.840×10^{-6}	63
$X_3 Z_1^2$	3.471×10^{-4}	5.657×10^{-5}	1.100×10^{-6}	38
$X_1 X_4$	-2.084×10^{-3}	3.439×10^{-4}	1.070×10^{-6}	37
$X_4 Z_1^2$	2.577×10^{-4}	5.854×10^{-5}	5.600×10^{-7}	19
$X_2 X_3$	-9.957×10^{-4}	2.410×10^{-4}	5.000×10^{-7}	17
$X_2 Z_1^2$	1.968×10^{-4}	5.936×10^{-5}	3.200×10^{-7}	11
$X_2 X_4$	-7.077×10^{-4}	2.410×10^{-4}	2.500×10^{-7}	8.6
$X_1 X_3 Z_1$	5.901×10^{-4}	2.554×10^{-4}	1.600×10^{-7}	5.3
$X_1 X_2 Z_1^2$	4.770×10^{-4}	2.095×10^{-4}	1.500×10^{-7}	5.2
$X_1 X_4 Z_2^2$	-6.261×10^{-4}	2.767×10^{-4}	1.500×10^{-7}	5.1
$X_1 Z_1^2$	1.298×10^{-4}	6.133×10^{-5}	1.300×10^{-7}	4.5

Tableau G.8 : ANOVA pour les paramètres de la densité apparente

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X_4	3.89	0.06	2.581×10^2	4 189
X_3	2.53	0.06	1.088×10^2	1 766
X_2	1.9	0.06	6.156×10^1	999
X_1	1.53	0.06	3.957×10^1	642
$X_4 Z_1$	0.21	0.06	6.743×10^{-1}	11
$X_3 Z_1$	0.2	0.06	6.301×10^{-1}	10
$X_2 Z_1$	0.19	0.06	5.165×10^{-1}	8.4
$X_1 Z_1$	0.16	0.06	3.979×10^{-1}	6.5

Tableau G.9 : ANOVA pour les paramètres de l'allongement à la rupture

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X_4	10.67	0.11	1.256×10^3	9 643
X_3	8.3	0.14	4.642×10^2	3 565
X_1	5.53	0.1	3.670×10^2	2 819
X_2	4.5	0.11	2.232×10^2	1 714
$X_4 Z_2$	1.62	0.13	2.166×10^1	166
$X_2 X_4$	4.91	0.51	1.209×10^1	93
$X_1 X_4$	4.41	0.51	9.765×10^0	75
$X_3 Z_1$	0.56	0.09	5.436×10^0	42
$X_3 Z_1^2$	-0.53	0.12	2.578×10^0	20
$X_2 X_4 Z_2$	-2.10	0.48	2.458×10^0	19
$X_1 X_4 Z_2$	-1.61	0.48	1.453×10^0	11
$X_1 X_3 Z_1^2$	1.08	0.42	8.503×10^{-1}	6.5
$X_3 X_4 Z_2$	-1.22	0.48	8.275×10^{-1}	6.4
$X_2 X_4 Z_1$	1.03	0.42	7.855×10^{-1}	6
$X_2 X_3$	1.24	0.51	7.725×10^{-1}	5.9

Tableau G.10 : ANOVA pour les paramètres de l'allong. à la rupture humide

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X_2	59.2	0.2	3.249×10^4	121 392
X_1	74	0.2	3.199×10^4	119 521
X_3	36.5	0.2	8.566×10^3	32 009
X_4	25.2	0.2	7.007×10^3	26 184
X_1X_4	-15.2	0.7	1.166×10^2	436
X_4Z_2	-1.8	0.1	5.910×10^1	221
X_2Z_1	2.1	0.1	5.520×10^1	206
X_3Z_1	1.6	0.1	3.275×10^1	122
X_1Z_1	1.2	0.1	1.756×10^1	66
X_2X_4	-6.3	1	1.041×10^1	39
$X_1X_4Z_1$	3.1	0.7	5.265×10^0	20
$X_1Z_1^2$	-0.7	0.2	5.259×10^0	20
X_1X_2	3	0.7	4.634×10^0	17
$X_2X_3Z_1$	-2.4	0.8	2.499×10^0	9.3
X_2X_3	2.2	0.7	2.439×10^0	9.1
$X_3Z_1^2$	-0.3	0.2	1.175×10^0	4.4
$X_2X_4Z_1^2$	-1.6	0.8	1.153×10^0	4.3

Tableau G.11 : ANOVA pour les paramètres du coefficient de diffusion

Variable	Paramètre estimé	Erreur standard	SC = MC	F
X_1	7.01	0.04	8.352×10^2	30 276
X_2	3.91	0.04	2.603×10^2	9 434
X_3	1.03	0.04	1.796×10^1	651
X_4	0.62	0.04	6.571×10^0	238
X_1Z_1	0.24	0.04	9.188×10^{-1}	33
X_2Z_1	0.2	0.04	6.284×10^{-1}	23

Tableau G.12 : ANOVA pour les paramètres du coefficient d'absorption

RÉFÉRENCES

1. Chatterjee, A., Roy, D.N., Whiting, P., **Effect of Recycling on Strength, Optical and Surface Properties of Handsheets**, Prétirés 78° Congrès annuel, Section technique, CPPA, A277-A282, (janvier 1992).
2. Lippert, G.V., Tuominen, R., Nerg, H., **A New Furnish for Newsprint : Deinked Pulp and Super Pressure Groundwood**, Prétirés 78° Congrès annuel, Section technique, CPPA, B125-B134, (janvier 1992).
3. Gaudreault, R., Marchildon, L., Lapointe, M., **The Effect of Deinked Pulp on Physico-Chemical and Optical Properties of Thermomechanical Pulp**, Prétirés 78° Congrès annuel, Section technique, CPPA, A235-A240, (janvier 1992).
4. Horn, R.A., Wegner, T.H., Kugler, D.E., **Newsprint from Blends of Kenaf CTMP and Deinked Recycled Newsprint**, Tappi Journal, 69-72, (décembre 1992).
5. Frazier, W.C., Jackson, M., Collicutt, S.A., **Behavior of Thermomechanical Pulp in Newsprint Furnishes : a Laboratory Study**, Pulp & Paper Canada 77 (2), 41-46, (février 1976).
6. Pere, J., **WEB-Offset Newsprint : Evaluation of the Effect of Some Raw Material Components upon Printability and Linting**, Paperi ja Puu - Papper och Trä n° 9, 473-480, (1978).
7. Lindholm, C.-A., **Comparaison of Some Papermaking Properties of Groundwood, Pressure Groundwood and Thermomechanical Pulp by**

Means of Artificial Blends of Pulp Fractions - Part 3. The Fibre Fractions, Papperi ja Puu - Papper och Trä n° 8, 487-497, (1981).

8. Franzén, R., Jännäri, P., **Mechanical Pulp in High Brightness Information Papers**, Pulp & Paper Canada 90 (1), T18-23, (janvier 1989).
9. Lindholm, C.-A., **Comparaison of Some Papermaking Properties of Groundwood, Pressure Groundwood and Thermomechanical Pulp by Means of Artificial Blends of Pulp Fractions - Part 4. Results of the Series of Investigation**, Papperi ja Puu - Papper och Trä n° 9, 551-558, (1982).
10. Mohlin, U.B., Wennberg, K., **Some Aspects of the Interaction Between Mechanical and Chemical Pulps**, Tappi 67 (1), 90-93, (janvier 1984).
11. Brecht, W., **The Mixing of Different Pulps and its Effect on the Physical Properties of Paper**, Svensk Papperstidning 66(5), (Mars 1963).
12. Wood, J.R., Karnis, A., **Future Furnish Requirements for Newsprint and Mechanical Printing Papers**, Pulp & Paper Canada 92 (1), 72-75, (1991).
13. Mohlin, U.B., Olander, K., **The Influence of Mechanical Pulp Quality on The Properties of Filler-Containing Papers**, Nordic Pulp and Paper Research Journal n° 4, 44-50, (1986).
14. Bristow, J.A., Pauler, N., **Multilayer Structures in Printing Papers**, Svensk Papperstidning, R164-R172, (1983).
15. Smook, G., **The Role of Chemical Pulp in Newsprint Manufacture**, Pulp and Paper Canada 80 (4), T123-T128, (1979).
16. Dillén, S., **Will TMP Replace Groundwood or Chemical Pulp in Newsprint**, International Mechanical Pulping Conference, San Francisco, 237-244, (1975).
17. Vámos, G., Méro, T., **Evaluation of Straw Pulp and Hardwood Pulp Mixtures**, Tappi 43 (10), 168A-172A, (octobre 1960).

18. Vámos, G., Méro, T., Lengyel, P., Rising Utilization of Straw Pulp in the Paper Industry, Tappi 40 (7), 180A-188A, (juillet 1957).
19. Vámos, G., Méro, T., The Effect of Some Papermaking Materials upon Certain Characteristics of Paper, Tappi 41 (5), 196A-206A, (mai 1958).
20. Bousquet, P., Valade, J.L., Lapointe, M., Introduction de Pâte Thermomécanique dans un Mélange pour Papiers fins, Revue ATIP (France), 35 (3), 129-134, (1981).
21. Ionides, G.N., Jackson, M., Implications of Basis-Weight Reduction for Newsprint Quality, Tappi Journal, 69-72, (novembre 1986).
22. Whiting, P., McDonald J.D., Pitcher, J.M., Predicting the Brightness of Pulp Mixtures - An Experimental Test of the Theory, Pulping Conference, 173-181, (1984).
23. Amiri, R., Wood, J.R., Karnis, A., Pulp Mixtures : A Literature Survey, Rapport interne de Paprican, (août 1989).
24. Seth, R.S., Barbe, M.C., Williams, J.C.R., Page, D.H., The Strength of Wet Webs : a New Approach, Tappi 65 (3), 135-138, (mars 1982).
25. Khuri, A.I., Cornell, J.A., Response Surfaces : Designs and Analyses, Statistics : Textbooks and Monographs, D.B. Owen, 405 pages.